

# FEUILLETAGES ET ACTIONS DE GROUPES

## SUR LES ESPACES PROJECTIFS

JULIE DESERTI ET DOMINIQUE CERVEAU

ABSTRACT. A holomorphic foliation  $\mathcal{F}$  on a compact complex manifold  $M$  is said to be an  $\mathcal{L}$ -foliation if there exists an action of a complex Lie group  $G$  such that the generic leaf of  $\mathcal{F}$  coincides with the generic orbit of  $G$ . We study  $\mathcal{L}$ -foliations of codimension one, in particular in projective space, in the spirit of classical invariant theory, but here the invariants are sometimes transcendental ones. We give a bestiary of examples and general properties. Some classification results are obtained in low dimensions.

---

<sup>0</sup>IRMAR, UMR 6625 du CNRS, Université de Rennes I, 35042 Rennes, France.



## Table des matières

Introduction	5
Introduction	5
Chapitre 1. $\mathcal{L}$ -feuilletages.	13
1. Feuilletages de codimension 1 de $\mathbf{CP}(n)$ associés à une algèbre de Lie de champs de vecteurs. Premières propriétés.	13
2. $\mathcal{L}$ -feuilletages avec une singularité isolée en dimension $n \geq 3$ .	24
3. Théorèmes généraux.	28
Chapitre 2. Exemples.	35
1. Principe de construction d'exemples.	35
2. Exemples logarithmiques.	38
3. Exemples issus de formes quadratiques.	39
4. Exemples issus d'actions classiques.	40
5. Exemple de Gordan-Noether.	49
Chapitre 3. $\mathcal{L}$ -feuilletages de degrés 0 et 1 sur $\mathbf{CP}(n)$ .	53
1. Feuilletages de degré 0 sur $\mathbf{CP}(n)$ .	53
2. Feuilletages de degré 1 sur $\mathbf{CP}(n)$ .	54
Chapitre 4. $\mathcal{L}$ -feuilletages sur $\mathbf{CP}(3)$ .	59
1. Feuilletages de degré 2 sur $\mathbf{CP}(3)$ .	59
2. $\mathcal{L}$ -feuilletages de degré 2 sur $\mathbf{CP}(3)$ .	62
Chapitre 5. $\mathcal{L}$ -feuilletages quadratiques sur $\mathbf{CP}(n)$ .	79
1. $\mathcal{L}$ -feuilletages quadratiques sur $\mathbf{CP}(n)$ , $n \geq 4$ .	79
2. Exemples de type 4.1.	87
Chapitre 6. $\mathcal{L}$ -feuilletages de degré trois sur $\mathbf{CP}(4)$ .	95
1. L'algèbre $\mathcal{L}$ est isomorphe à $sl(2, \mathbf{C})$ .	95
2. L'algèbre $\mathcal{L}$ est abélienne	98
3. L'algèbre $\mathcal{L} = \mathcal{L}_\alpha$ a pour présentation $\{[X, Y] = Y, [X, Z] = \alpha Z, [Y, Z] = 0\}$ , $\alpha \neq 0$ .	103
4. L'algèbre $\mathcal{L}$ a pour présentation $\{[X, Y] = [X, Z] = 0, [Y, Z] = Y\}$ .	130
5. L'algèbre $\mathcal{L}$ a pour présentation $\{[X, Y] = [X, Z] = 0, [Y, Z] = X\}$ .	139

6.	L'algèbre $\mathcal{L}$ a pour présentation $\{[X, Y] = Y, [X, Z] = Y + Z, [Y, Z] = 0\}$ .	142
Chapitre 7.	$\mathcal{L}$ -feuilletages de degré 0 et de codimension quelconque sur $\mathbf{CP}(n)$ .	147
	Bibliographie	151

## Introduction

La théorie classique des invariants, au sens où l'on peut l'entendre au XIX<sup>ème</sup> siècle, propose étant donnée une action algébrique d'un groupe algébrique  $G$  sur une variété algébrique compacte  $M$  de décrire le corps des fonctions rationnelles  $R$  sur  $M$  invariantes sous l'action de  $G$ .

Parmi les pionniers de la théorie des invariants, on retiendra en particulier Sylvester et Hesse, puis Gordan et Noether qui font une approche que l'on qualifierait aujourd'hui d'effective. Ces travaux accompagnent le développement de l'algèbre linéaire, de la théorie des matrices et de la géométrie projective. Cette approche change radicalement, non sans polémique, avec les travaux de Hilbert et Hurwitz.

La géométrie classique produit tout un folklore d'exemples. Nous en rappelons certains, en liaison avec la classification des objets algébriques ; l'un des plus populaires est sans doute l'invariant  $j$  des courbes elliptiques que l'on peut voir de différentes manières : action de  $\mathbf{PGL}(2, \mathbf{C})$  sur

$$\mathbf{CP}(4) \simeq \{\text{quadruplets de points sur la sphère de Riemann}\}$$

ou action de  $\mathbf{PGL}(3, \mathbf{C})$  sur

$$\mathbf{CP}(9) \simeq \{\text{courbes de degré 3 dans } \mathbf{CP}(2)\}$$

etc. Nous mentionnerons aussi l'exemple de Gordan-Noether en réponse à une affirmation de Hesse. L'ubiquité de cet exemple est tout à fait étonnante.

Dans tout le discours qui suit les objets sont définis sur le corps  $\mathbf{C}$  des nombres complexes. Si  $\text{Aut } M$  désigne le groupe des automorphismes de  $M$ , on dispose d'un morphisme  $\varphi : G \rightarrow \text{Aut } M$  et  $R$  est invariante si

$$R(\varphi(g).m) = R(m)$$

pour tout  $m \in M$  et  $g \in G$ . Si  $\chi(M)$  désigne l'espace des champs de vecteurs holomorphes sur  $M$ , on sait, lorsque  $M$  est compacte, que  $\chi(M)$  est une  $\mathbf{C}$ -algèbre de Lie de dimension finie qui s'identifie naturellement à  $\mathcal{L}ie(\text{Aut } M)$ . Par suite,  $\varphi$  induit un morphisme d'algèbres de Lie

$$D\varphi : \mathcal{L}ie G \rightarrow \mathcal{L}ie(\text{Aut } M) \simeq \chi(M)$$

et produit une sous-algèbre de Lie  $\mathcal{L}$  de  $\chi(M)$  : l'image de  $D\varphi$ . Notons que l'action de  $G$  sur  $M$  produit un « feuilletage » singulier  $\mathcal{F}$  de la variété  $M$ .

Nous dirons que  $\mathcal{F}$  est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage. Evidemment ce feuilletage peut être trivial, par exemple lorsque l'action est transitive ou à l'inverse lorsque  $G$  est un groupe discret. On s'intéressera au cas où ce feuilletage est de codimension 1 dans une situation générale, en particulier lorsque l'action n'est plus algébrique, c'est-à-dire lorsque les feuilles du feuilletage associé sont transcendentes. Sur une variété algébrique  $M$  compacte, un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de codimension 1 est associé à une 1-forme fermée rationnelle  $\Omega$ . C'est une conséquence à peu près directe du fait que le groupe d'automorphismes de  $M$  est algébrique. Comme nous l'a signalé Serge Cantat, ce résultat persiste si  $M$  est compacte kählérienne. Par contre ce n'est plus vrai dans le cas non kähler. L'exemple le plus standard est le suivant : soit  $\Gamma \subset \mathrm{SL}(2, \mathbf{C})$  un sous-groupe discret cocompact. La variété  $M = \mathrm{SL}(2, \mathbf{C})/\Gamma$  est munie d'un  $\mathcal{L}$ -feuilletage correspondant à l'action du groupe triangulaire sur  $M$ . Ce feuilletage n'est pas défini par une 1-forme fermée mais est « transversalement projectif ». Il est probable que ce soit un fait général, ceci étant conforté par un résultat récent de [4].

Donnons maintenant quelques propriétés des  $\mathcal{L}$ -feuilletages de codimension 1 sur les espaces projectifs  $\mathbf{CP}(n)$  (chapitre 1). Le degré d'un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(n)$  est majoré par  $n-1$  ; lorsqu'il est maximal, on a alors  $\dim \mathcal{L} = n-1$  et on peut profiter pour  $n$  petit de la classification des algèbres de Lie pour donner une description des « invariants généralisés » de  $\mathcal{F}$ . Par invariant généralisé on entend une primitive de la forme fermée rationnelle  $\Omega$  définissant  $\mathcal{F}$  ou toute fonction « élémentaire » intégrale première de  $\mathcal{F}$ . Remarquons que les feuilles d'un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de codimension 1 sur  $\mathbf{CP}(n)$  sont dominées par  $\mathbf{C}^{n-1}$  ; il suffit de choisir  $n-1$  éléments génériques  $X_1, \dots, X_{n-1}$  dans  $\mathcal{L}$  et de considérer l'application

$$(t_1, \dots, t_{n-1}) \mapsto \exp(t_1 X_1) \circ \dots \circ \exp(t_{n-1} X_{n-1})(z)$$

qui est d'image dense dans la feuille passant par  $z$ . Ceci explique pourquoi les formes fermées  $\Omega$  intervenant ici sont très spéciales ; par exemple le complément des pôles de  $\Omega$  (les pôles sont invariants par  $\mathcal{F}$ ) ne peut être Kobayashi hyperbolique. Les feuilles d'un  $\mathcal{L}$ -feuilletage peuvent être denses ou d'adhérence des variétés réelles Levi-plates.

Nous montrons qu'un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(n)$ ,  $n \geq 3$ , possédant un point singulier isolé est nécessairement de degré 1 et que dans une carte affine ad-hoc les feuilles sont les niveaux d'une forme quadratique de rang maximum. C'est une conséquence plus ou moins directe du théorème de Frobenius singulier de B. Malgrange. Ce résultat devrait avoir un analogue en codimension supérieure.

Nous décrivons ensuite quelques propriétés des  $\mathcal{L}$ -feuilletages liées à la nature algébrique de  $\mathcal{L}$ . Par exemple si tous les éléments de  $\mathcal{L}$  sont nilpotents, le feuilletage associé possède une intégrale première rationnelle. Il faut cette hypothèse forte car même dans le cas abélien ce résultat ne persiste pas. Modulo des hypothèses de régularité naturelles et nécessaires, si  $\mathcal{L}$  est résoluble,  $\mathcal{F}$

possède un hyperplan invariant. Enfin si  $[\mathcal{L}, \mathcal{L}] = \mathcal{L}$ , ce qui est le cas si  $\mathcal{L}$  est semi-simple, alors  $\mathcal{F}$  possède encore un invariant rationnel.

Le chapitre 2 est consacré à la description d'exemples, issus d'actions de groupes, pour la plupart classiques.

Dans le chapitre 3 nous montrons que les feuilletages de degrés 0 et 1 sur  $\mathbf{CP}(n)$  sont des  $\mathcal{L}$ -feuilletages. Nous donnons la liste des invariants généralisés correspondants.

Le chapitre 4 est consacré à la description complète des  $\mathcal{L}$ -feuilletages sur  $\mathbf{CP}(3)$ . De cette étude on peut déduire le théorème suivant :

**THÉORÈME 0.1.** *Soit  $G$  un groupe de Lie complexe connexe agissant sur  $\mathbf{CP}(3)$ . On est dans l'un des cas suivants :*

- (i) *l'action est triviale,*
- (ii) *il existe une orbite dense,*
- (iii) *l'orbite générique est de dimension 2 et l'action de  $G$  possède un invariant généralisé (fonction constante sur les feuilles, éventuellement multivaluée) appartenant à conjugaison près à la liste qui suit :*

$$\begin{aligned}
& z_0^{\lambda_0} z_1^{\lambda_1} z_2^{\lambda_2} \text{ où } \sum_{i=0}^2 \lambda_i = 0, \quad z_0^{\lambda_0} z_1^{\lambda_1} z_2^{\lambda_2} z_3^{\lambda_3} \text{ où } \sum_{i=0}^3 \lambda_i = 0, \quad \frac{z_0}{z_1}, \\
& \frac{z_1}{z_3} \exp\left(\frac{z_0 z_3 + z_2 z_1}{z_1 z_3}\right), \quad \frac{z_0}{z_3} \exp\left(\frac{z_2^2 - z_1 z_3}{z_3^2}\right), \quad \frac{z_0}{z_3} \exp\left(\frac{z_2^2 - z_1 z_3}{z_0 z_3}\right), \\
& \frac{z_1 z_3^{\kappa-1}}{z_0^\kappa} \exp\left(\frac{z_2}{z_3}\right), \quad \frac{z_0}{z_1} \exp\left(\frac{z_2}{z_1}\right), \quad \frac{z_3^2}{z_1 z_3 - z_2^2} \exp\left(\frac{z_0}{z_3}\right), \\
& \frac{z_2}{z_3} \exp\left(\frac{z_0 z_3 - z_1 z_2}{z_3^2}\right), \quad \frac{z_0 z_3 - z_1 z_2}{z_3^2} \exp\left(\frac{z_2}{z_3}\right), \\
& \frac{Q}{z_0^2} \text{ où } Q \text{ est une forme quadratique,} \\
& \frac{z_0 z_3^2 + z_1 z_2 z_3 + z_2^3}{z_3^3}, \quad \frac{z_0^2 z_3^{2\kappa}}{z_3^2 (z_1 z_3 - z_2^2)^\kappa}, \\
& \frac{z_0 z_3 + z_2 z_1}{z_1 z_3}, \quad \frac{(z_0 z_3 - z_1 z_2)^\kappa}{z_2^{\kappa+1} z_3^{\kappa-1}} \text{ avec } \kappa \neq \pm 1 \text{ et} \\
& \frac{(z_0 z_3^2 - z_1 z_2 z_3 + \frac{z_2^3}{3})^2}{(z_1 z_3 - \frac{z_2^2}{2})^3} \text{ où } \kappa \text{ et } \lambda_i \in \mathbf{C}.
\end{aligned}$$

(iv) l'orbite générique est de dimension 1 ; le feuilletage associé est celui d'un champ de vecteurs linéaire.

Ce théorème permet d'envisager une description topologique systématique des feuilles des  $\mathcal{L}$ -feuilletages sur  $\mathbf{CP}(3)$ .

On note l'étrange fait suivant : toutes les surfaces invariantes qui apparaissent ci-dessus (ce sont les pôles de  $\Omega$ ) sont données par les zéros de polynômes à coefficients entiers.

Rappelons qu'un polynôme  $P \in \mathbf{C}[z_1, \dots, z_n]$  est dit minimal s'il est à fibre générique connexe. Tout polynôme  $P$  se factorise comme suit :  $P = p(Q)$  où  $p \in \mathbf{C}[t]$  et  $Q$  est un polynôme minimal.

Du théorème précédent on déduit le :

**COROLLAIRE 0.2.** *Soit  $P \in \mathbf{C}[z_1, z_2, z_3]$  un polynôme minimal ; notons*

$$G^P := \{g : \mathbf{C}^3 \rightarrow \mathbf{C}^3 \text{ affine, } P \circ g = P\}.$$

*On suppose que l'orbite générique de  $G^P$  est de dimension 2, i.e.  $P$  est précisément l'invariant de  $G^P$ . Alors à conjugaison près  $P$  appartient à la liste qui suit :*

$$z_0, \quad z_0^{p_0} z_1^{p_1} z_2^{p_2}, \quad z_0^{p_0} z_1^{p_1}$$

$$Q, \quad z_0 + z_1 z_2 + z_2^3$$

*où  $Q$  désigne un polynôme de degré 2,  $p_i \in \mathbb{N}$  et  $\gcd(p_0, \dots) = 1$ .*

Le chapitre 5 est consacré aux  $\mathcal{L}$ -feuilletages de degré 2. Actuellement nous n'en avons pas la description générale pour  $n \geq 4$ . On présente quelques exemples et on traite certains cas spéciaux.

Dans le chapitre 6 on propose ce qui devrait être la classification des  $\mathcal{L}$ -feuilletages de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$ . Comme on l'a dit  $\mathcal{L}$  est ici de dimension trois. Nous avons utilisé le logiciel Maple pour décrire certaines sous-algèbres résolubles de dimension 3 de l'algèbres des matrices complexes  $5 \times 5$ . Une fois cette description, c'est-à-dire les différentes possibilités d'algèbres  $\mathcal{L}$ , obtenue, les calculs des invariants sont localement triviaux mais très lourds. Nous en avons présenté quelques-uns, même au risque de rebuter le lecteur... La taille des calculs explose de la dimension trois à la dimension quatre et certains « résultats » ne seront finalement que des observations. Toutefois même si l'on ne peut prétendre obtenir des énoncés au sens classique, ceci permet de présenter une grande liste d'exemples que l'on peut espérer être exhaustive. Bien sûr, chaque fois qu'un énoncé dépend de l'utilisation de Maple, nous le signalerons.



Précisons tout de même quelques résultats sur  $\mathbf{CP}(4)$ . Si  $\mathcal{F}$  est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$  alors l'algèbre de Lie  $\mathcal{L}$  fait partie de la liste suivante :

1.  $sl(2, \mathbf{C})$
2.  $\mathbf{C}^3$
3.  $\mathcal{L}_\alpha$  dont la présentation est  $\{[X, Y] = Y, [X, Z] = \alpha Z, [Y, Z] = 0\}$
4.  $\mathcal{L}_0 = \mathbf{C} \oplus A$  où  $A$  est l'algèbre de Lie du groupe affine.

On note qu'il manque ici quelques algèbres de dimension 3 ; en fait ce sont des dégénérescences des précédentes qui ne produisent pas de  $\mathcal{L}$ -feuilletages de degré 3. C'est le traitement des cas 3 et 4 qui a nécessité l'usage de Maple. Nous avons trouvé 17 modèles dans l'éventualité 3 et 9 dans l'éventualité 4. L'étude des situations 1 et 2 se fait de façon classique. On obtient les deux résultats suivants :

**THÉORÈME 0.3.** *Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$ . Si  $\mathcal{L}$  est abélienne, alors le feuilletage  $\mathcal{F}$  admet à conjugaison près l'une des intégrales premières suivantes :*

$$\begin{aligned}
& z_0^{\kappa_0} z_1^{\kappa_1} z_2^{\kappa_2} z_3^{\kappa_3} z_4^{\kappa_4} \sum_{j=0}^4 \kappa_j = 0 \\
& \frac{z_1^{\kappa+\xi+1}}{z_2^\kappa z_3^\xi z_4} \exp\left(\frac{z_0}{z_1}\right) \\
& \frac{z_3^\kappa z_4}{z_1^{1+\kappa}} \exp\left(\frac{z_1 z_2 - z_0 z_3}{z_1 z_3}\right) \\
& \frac{z_0 z_4^2 - z_1 z_2 z_4 + z_1 z_3^2}{z_1 z_4^2} \\
& \left(\frac{z_1}{z_4}\right) \exp\left(\frac{z_0 z_4^2 - z_1 z_2 z_4 + z_1 z_3^2}{z_1 z_4^2}\right) \\
& \frac{z_1^\kappa z_4^{1-\kappa}}{z_0} \exp\left(\frac{z_3^2 - z_2 z_4}{z_4^2}\right) \\
& \frac{z_0}{z_4} \exp\left(\frac{z_1 z_4^2 + z_2 z_3 z_4 - z_3^3}{z_4^3}\right) \\
& \frac{z_0 z_4^3 + z_1 z_3 z_4^2 - \frac{z_2^2 z_4^2}{2} - \frac{z_3^4}{4} + z_2 z_3^2 z_4}{z_4^4}
\end{aligned}$$

Les  $\kappa_i$ ,  $\kappa$  et  $\xi$  sont des nombres complexes.

Dans le cas où  $\mathcal{L}$  est isomorphe à  $sl(2, \mathbf{C})$  on montrera le :

**THÉORÈME 0.4.** *Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$ . Si  $\mathcal{L}$  est isomorphe à  $sl(2, \mathbf{C})$ , alors le feuilletage  $\mathcal{F}$  admet à conjugaison près l'une des intégrales premières suivantes :*

$$\frac{z_3^2 z_4^2 - 4z_2 z_4^3 - 4z_3^3 z_5 + 18z_2 z_3 z_4 z_5}{z_1^4} \\ \frac{(z_3 z_2^2 + z_5 z_1^2 - z_1 z_2 z_4)^2}{\left(z_3 z_5 - \frac{z_4^2}{4}\right)^3}$$

Nous terminons par un court chapitre d'exemples de  $\mathcal{L}$ -feuilletages de codimension supérieure ou égale à 2.

Notre classification est exprimée en termes de feuilletages, plus précisément en termes d'intégrales premières. Nous n'avons pas listé les actions de groupes ; mais dans le texte on trouvera les différentes sous-algèbres de Lie qui produisent des  $\mathcal{L}$ -feuilletages. On peut en déduire aisément les actions de groupes correspondantes.

Les  $\mathcal{L}$ -feuilletages jouent aussi un rôle important dans l'étude locale des singularités de feuilletages. En dimension trois, il existe une théorie de réduction des singularités ([2], [1]) ; les modèles locaux après réduction sont les  $\mathcal{L}$ -feuilletages associés à des algèbres de Lie abéliennes. Ils interviennent aussi de façon naturelle sur les variétés compactes complexes sans fonction méromorphe non constante mais possédant suffisamment d'automorphismes (tores généraux et plus généralement certains quotients de groupes de Lie par des réseaux co-compacts etc). Sur ces variétés  $M$  tout feuilletage est associé à la donnée d'une sous-algèbre de Lie de l'algèbre  $\chi(M)$ . Initialement nous avons entrepris cette étude pour la raison suivante. Il existe un feuilletage  $\mathcal{F}_\Gamma$  dit exceptionnel sur  $\mathbf{CP}(3)$  associé à une action du groupe des transformations affines de la droite. Ce feuilletage est « stable » et par conséquent l'adhérence de l'orbite de  $\mathcal{F}_\Gamma$  sous l'action naturelle de  $\text{Aut } \mathbf{CP}(3) \simeq \mathbf{PGL}(4, \mathbf{C})$  est une composante de l'espace des feuilletages de codimension 1 sur  $\mathbf{CP}(3)$ . Les adhérences des feuilles de  $\mathcal{F}_\Gamma$  sont des surfaces de degré six, degré « anormalement » grand. La question est de savoir s'il existe d'autres feuilletages exceptionnels associés à des actions de groupe. Nous avons trouvé parmi les  $\mathcal{L}$ -feuilletages sur  $\mathbf{CP}(4)$  un candidat à être exceptionnel ; il est de degré trois et ses feuilles sont des hypersurfaces de degré douze. Elles sont données par les niveaux de la fonction rationnelle

$$\frac{\left(z_0 z_4^3 - \frac{z_2^2 z_4^2}{2} - z_3 z_4^2 + z_2 z_3^2 z_4 - \frac{z_3^4}{4}\right)^3}{\left(z_1 z_4^2 - z_2 z_3 z_4 + \frac{z_3^3}{3}\right)^4}$$

On conjecture que ce feuilletage est stable.

L'essentiel du mémoire est « self-contained » ; nous avons laissé dans le texte des calculs explicites qui, bien que tous élémentaires, illustrent diverses techniques d'approche.

Nous remercions J. Pereira pour sa gentillesse et sa disponibilité permanentes.



## CHAPITRE 1

### $\mathcal{L}$ -feuilletages.

#### 1. Feuilletages de codimension 1 de $\mathbf{CP}(n)$ associés à une algèbre de Lie de champs de vecteurs. Premières propriétés.

On note  $\pi : \mathbf{C}^{n+1} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbf{CP}(n)$  la projection canonique. Si  $\omega = \sum_{k=0}^n A_k dz_k$  est une 1-forme intégrable sur  $\mathbf{C}^{n+1}$  avec  $A_k$  polynôme homogène de degré  $\nu$  sur  $\mathbf{C}^{n+1}$ , on désigne par  $\mathcal{Sing} \omega$  le lieu singulier de  $\omega$

$$\mathcal{Sing} \omega := \{A_0 = \dots = A_n = 0\}$$

Dans toute la suite on suppose, quitte à diviser les  $A_i$  par  $\gcd(A_0, \dots, A_n)$ , que  $\text{codim}_{\mathbf{C}} \mathcal{Sing} \omega \geq 2$ . On dira que  $\nu$  est le degré de  $\omega$ . Le feuilletage associé à la 1-forme  $\omega$  descend à  $\mathbf{CP}(n)$  si et seulement si  $\sum_{k=0}^n z_k A_k = 0$  et tout feuilletage  $\mathcal{F}$  de dimension 1 sur  $\mathbf{CP}(n)$  est ainsi défini. Le feuilletage défini par  $\omega$  sur  $\mathbf{C}^{n+1}$  est noté  $\tilde{\mathcal{F}}$  mais on dira indifféremment que  $\omega$  définit  $\mathcal{F}$  ou  $\tilde{\mathcal{F}}$ . L'égalité  $\text{Aut } \mathbf{CP}(n) = \mathbf{PGL}(n+1, \mathbf{C})$  conduit à

$$\chi(\mathbf{CP}(n)) = \mathcal{L}\text{ie Aut } \mathbf{CP}(n) \simeq \mathcal{M}(n+1, \mathbf{C}) / \mathbf{C}.Id$$

où  $\chi(\mathbf{CP}(n))$  désigne l'ensemble des champs de vecteurs holomorphes sur  $\mathbf{CP}(n)$  et  $\mathcal{M}(n+1, \mathbf{C})$  l'espace des matrices complexes  $(n+1) \times (n+1)$ . Ainsi un champ de vecteurs holomorphes sur  $\mathbf{CP}(n)$  peut être vu comme un champ de vecteurs linéaire sur  $\mathbf{C}^{n+1}$  modulo  $\mathbf{C}.R$  où  $R$  désigne le champ radial  $R = \sum_{i=0}^n z_i \frac{\partial}{\partial z_i}$ . Notons encore que l'identification champs-matrices est naturelle puisque le flot d'un champ linéaire  $X$  est du type  $e^{tA}x$  où  $A$  est « la matrice » de  $X$ . On prendra garde au fait que si les matrices  $A$  et  $B$  correspondent aux champs  $X$  et  $Y$ , alors le crochet de Lie  $[X, Y]$  correspond à  $BA - AB$ .

Soit  $\mathcal{F}$  un feuilletage de codimension 1 sur l'espace projectif  $\mathbf{CP}(n)$ . On introduit la

DÉFINITION. On dit que  $\mathcal{F}$  est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de codimension 1 s'il existe une sous-algèbre de Lie  $\mathcal{L}$  de  $\chi(\mathbf{CP}(n))$  telle qu'en tout point générique  $z \in \mathbf{CP}(n)$  on ait la propriété :

$$\mathcal{L}(z) \text{ est l'espace tangent à la feuille de } \mathcal{F} \text{ en } z. \quad (*)$$

En particulier, on a  $\dim_{\mathbf{C}} \mathcal{L}(z) = \dim_{\mathbf{C}} \{X(z), X \in \mathcal{L}\} = n - 1$  pour  $z$  générique.

Dans la suite on suppose  $\mathcal{L}$  maximale pour la propriété (\*).

On peut de même définir les  $\mathcal{L}$ -feuilletages sur  $\mathbf{C}^n$  : il suffit de demander que les éléments de  $\mathcal{L}$  soient des champs de vecteurs affines (on prend une définition rigide compatible avec la prise de carte affine).

On peut étendre la notion de  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(n)$  ou  $\mathbf{C}^n$  à la codimension  $q$  ; dans ce cas  $\dim \mathcal{L}(z) = n - q$ . Sauf mention expresse du contraire tous les  $\mathcal{L}$ -feuilletages seront de codimension 1 et l'on dira simplement  $\mathcal{L}$ -feuilletage.

REMARQUE. Soit  $Q(z_1, z_2, z_3) = z_1^2 + z_2^2 + z_3^2$  la forme quadratique standard sur  $\mathbf{C}^3$ . Le feuilletage sur  $\mathbf{CP}(3)$  décrit dans la carte affine  $\mathbf{C}^3 \subset \mathbf{CP}(3)$  par la forme  $dQ$  est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage dont l'algèbre de Lie  $\mathcal{L}$  est isomorphe à  $so(3; \mathbf{C})$  ; une base de  $\mathcal{L}$  est

$$X_{k,j} = z_k \frac{\partial}{\partial z_j} - z_j \frac{\partial}{\partial z_k}, \quad 1 \leq k < j \leq 3$$

en particulier l'algèbre  $\mathcal{L}$  est de dimension 3. Soit  $m \in \mathbf{C}^3 \setminus \{0\}$ , alors  $\mathcal{L}(m) = \langle X_{k,j}(m) \rangle$  est de dimension 2 car coïncide avec le plan tangent à la fibre  $Q^{-1}(m)$ . Ainsi l'égalité  $\dim \mathcal{L}(m) = 2$  en tout point  $m$  générique n'entraîne pas  $\dim \mathcal{L} = 2$ . Par ailleurs,  $so(3; \mathbf{C})$  est isomorphe à  $sl(2; \mathbf{C})$  et la sous-algèbre de dimension 2 :

$$\mathcal{L}_0 := \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ 0 & -a \end{pmatrix}, a, b \in \mathbf{C} \right\} \subset sl(2; \mathbf{C})$$

peut être vue dans  $so(3; \mathbf{C})$ . Soit  $\{X_1, X_2\}$  une base de  $\mathcal{L}_0$ . En un point générique  $m$ , les vecteurs  $X_1(m)$  et  $X_2(m)$  sont indépendants ; en particulier  $\mathcal{L}_0 \subsetneq so(3; \mathbf{C})$  et  $so(3; \mathbf{C})$  produisent le même feuilletage. C'est pour cette raison que l'on introduit une notion de maximalité pour  $\mathcal{L}$ .

Supposons que  $\mathcal{F}$  soit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de  $\mathbf{CP}(n)$  et que  $X_1, \dots, X_s$  soit une base de  $\mathcal{L} \subset \chi(\mathbf{CP}(n))$ . On note  $\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_s$  des relevés de  $X_1, \dots, X_s$  à  $\mathbf{C}^{n+1}$ . Les  $\tilde{X}_k$  sont des champs de vecteurs linéaires et le  $\mathbf{C}$ -espace vectoriel

engendré par  $R$  et les  $\tilde{X}_k$  est une algèbre de Lie notée  $\tilde{\mathcal{L}}$  de dimension  $s+1$ ; l'application  $\pi$  induit un morphisme d'algèbres

$$\pi_* : \tilde{\mathcal{L}} \rightarrow \mathcal{L}$$

satisfaisant

$$\pi_* \tilde{X}_k = X_k, \quad \pi_* R = 0 \text{ et } \ker \pi_* = \mathbf{C}R$$

On remarque que si  $\tilde{z} \in \mathbf{C}^{n+1}$  est un point générique alors  $\tilde{\mathcal{L}}(\tilde{z})$  est l'espace tangent à la feuille du feuilletage  $\tilde{\mathcal{F}}$ , relevé de  $\mathcal{F}$ , passant par  $\tilde{z}$ .

Introduisons la sous-algèbre de  $\tilde{\mathcal{L}}$  définie par

$$\mathcal{L}' := \{ \tilde{X} \text{ champs linéaires sur } \mathbf{C}^{n+1}, i_{\tilde{X}} d\omega = 0 \}.$$

où  $\omega$  définit le feuilletage  $\tilde{\mathcal{F}}$ .

On note que  $R \notin \mathcal{L}'$ ; en effet, l'identité d'Euler assure que  $i_R d\omega = (\nu+2)\omega \neq 0$  où l'entier  $\nu+1$  désigne le degré des composantes de  $\omega$ .

REMARQUE. Soit  $\omega$  une 1-forme intégrable sur  $\mathbf{C}^n$  définissant un feuilletage  $\tilde{\mathcal{F}}$ ; alors  $d\omega$ , si elle est non nulle, définit un feuilletage de codimension 2 « contenu dans le feuilletage  $\mathcal{F}$  ». En effet le théorème de Frobenius assure qu'au voisinage d'un point régulier  $m$ , il existe des coordonnées locales  $x_1, \dots, x_n$  dans lesquelles la 1-forme  $\omega$  s'écrit  $g dx_1$  où  $g \in \mathcal{O}^*(\mathbf{C}^n, m)$ . Si  $d\omega(m) \neq 0$ , alors  $dg \wedge dx_1 \neq 0$ ; on peut donc supposer que  $g = 1 - x_2$ , i.e.  $\omega = (1 - x_2)dx_1$  et  $d\omega = dx_1 \wedge dx_2$ . Ainsi localement l'espace des champs tangents au feuilletage défini par  $\omega$  coïncide avec l'espace engendré par les champs

$$\frac{\partial}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}$$

tandis que l'espace des champs tangents au feuilletage défini par  $d\omega$  est engendré par

$$\frac{\partial}{\partial x_3}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}$$

On remarque au passage que si  $i_X d\omega = 0$ , alors  $i_X \omega = 0$ ; ainsi  $\mathcal{L}'$  est associée au  $\mathcal{L}$ -feuilletage de codimension 2 de  $\mathbf{C}^{n+1}$  décrit par  $d\omega$  et  $\mathcal{L}' \subset \tilde{\mathcal{L}}$ .

On désigne par  $\Omega^q(X)$  l'ensemble des  $q$ -formes holomorphes sur l'espace  $X$ . Les deux énoncés suivants nous seront utiles :

LEMME 1.1. ([14]) Soient  $\alpha \in \Omega^1(\mathbf{C}^n, 0)$  tel que  $\text{codim}_{\mathbf{C}} \text{Sing } \alpha \geq p+1$  et  $\beta \in \Omega^q(\mathbf{C}^n, 0)$  avec  $q \leq p$ . Les assertions suivantes sont équivalentes :

(i)  $\alpha \wedge \beta = 0$

(ii) Il existe  $\gamma \in \Omega^{q-1}(\mathbf{C}^n, 0)$  tel que  $\beta = \alpha \wedge \gamma$ .

En particulier si  $\alpha$  et  $\beta$  sont deux germes de 1-formes holomorphes en 0 tels que  $\text{codim}_{\mathbf{C}} \mathcal{S}ing \alpha \geq 2$  et  $\beta \wedge \alpha = 0$ . Alors  $\beta$  s'écrit  $h\alpha$  où  $h$  est une fonction holomorphe.

DÉMONSTRATION. Faisons la pour  $q = 1$ . Ecrivons  $\alpha = \sum_{k=1}^n a_k dz_k$  et supposons d'abord que

$$\mathcal{S}ing \alpha = \{a_1 = \dots = a_n = 0\} = \emptyset$$

i.e. par exemple  $a_1 \neq 0$ . Soit  $X := \frac{1}{a_1} \frac{\partial}{\partial z_1}$ ; alors  $i_X \alpha = 1$  et l'égalité  $\alpha \wedge \beta = 0$  conduit à  $i_X(\alpha \wedge \beta) = 0$  et  $\gamma = -i_X \beta$  convient.

Si maintenant  $\text{codim}_{\mathbf{C}} \mathcal{S}ing \alpha \geq 2$  alors pour tout  $m \notin \mathcal{S}ing \alpha$ , on a

$$\beta(m) = h(m)\alpha(m)$$

où  $h$  est une fonction holomorphe sur  $(\mathbf{C}^n \setminus \mathcal{S}ing \alpha, 0)$ . Comme  $\text{codim} \mathcal{S}ing \alpha \geq 2$ , le théorème de prolongement d'Hartogs assure que  $h$  se prolonge en une fonction holomorphe sur  $(\mathbf{C}^n, 0)$  encore notée  $h$ . Réciproquement, si  $\beta = h\alpha$  alors  $\alpha \wedge \beta = 0$ .

Pour le cas général on renvoie le lecteur à [14].  $\square$

COROLLAIRE 1.2. Si  $\alpha$  et  $\beta$  sont deux 1-formes homogènes de même degré telles que  $\alpha \wedge \beta = 0$ . Alors  $\beta = h\alpha$  où  $h$  est une fonction rationnelle de degré 0. Si  $\text{codim} \mathcal{S}ing \alpha \geq 2$ , la fonction  $h$  est constante.

PROPOSITION 1.3. Le morphisme  $\pi_*$  induit un isomorphisme de  $\mathcal{L}'$  sur  $\mathcal{L}$ .

DÉMONSTRATION. Par la remarque qui précède, tout élément de  $\mathcal{L}'$  descend en un élément de  $\mathcal{L}$ . Soient  $X_1, \dots, X_s$  une base de  $\mathcal{L}$  et  $\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_s$  des relevés de  $X_1, \dots, X_s$  à  $\mathbf{C}^{n+1}$  par  $\pi$ . Les  $X_k$  forment une base de  $\mathcal{L}$  donc sont tangents au feuilletage; par conséquent  $\tilde{X}_k$  est tangent à  $\omega$ , i.e.  $i_{\tilde{X}_k} \omega = 0$ . Puisque  $\omega \wedge d\omega = 0$ , on a

$$i_{\tilde{X}_k} d\omega \wedge \omega = 0$$

et le corollaire 1.2 assure que

$$i_{\tilde{X}_k} d\omega = \mu(\tilde{X}_k)\omega$$

où  $\mu(\tilde{X}_k) \in \mathbf{C}$ . Comme  $L_R \omega = (\deg \omega + 1)\omega$ , quitte à changer  $\tilde{X}_k$  en  $\tilde{X}_k - \frac{\mu(\tilde{X}_k)}{\deg \omega + 1} R$ , on peut choisir  $\tilde{X}_k \in \mathcal{L}'$  et la proposition est évidente.  $\square$

On rappelle la



**DÉFINITION.** Un feuilletage  $\mathcal{F}$  est de degré  $\nu$  sur  $\mathbf{CP}(n)$  s'il est décrit en coordonnées homogènes par une 1-forme intégrable homogène  $\omega$  de degré  $\nu + 1$  satisfaisant  $\text{codim}_{\mathbf{C}} \text{Sing } \omega \geq 2$ .

Donnons une interprétation géométrique du degré. Soient  $\mathcal{F}$  un feuilletage sur  $\mathbf{CP}(n)$ ,  $\mathcal{D}$  une droite générique de  $\mathbf{CP}(n)$ ,  $z$  un point de  $\mathcal{D}$  et  $\mathcal{F}_z$  la feuille de  $\mathcal{F}$  passant par  $z$ ; le degré de  $\mathcal{F}$  est égal au nombre de points  $z \in \mathcal{D}$  tels que l'hyperplan tangent à  $\mathcal{F}_z$  en  $z$  contienne  $\mathcal{D}$ . En effet, soit  $\omega$  une 1-forme de degré  $\nu + 1$  sur  $\mathbf{C}^{n+1}$  définissant  $\mathcal{F}$ ;  $\omega$  s'écrit

$$\sum_{k=0}^n A_k dz_k$$

où les  $A_k$  sont des polynômes homogènes de degré  $\nu + 1$ . Dans la carte affine  $z_0 = 1$ , on note

$$\omega_0 := \omega|_{z_0=1} = \sum_{k=1}^n A_k(1, z_1, \dots, z_n) dz_k$$

Supposons que la droite  $\mathcal{D} := \{z_2 = \dots = z_n = 0\}$  soit une droite générique; dans la carte  $z_0 = 1$  le fait que  $\omega$  annule le champ radial se traduit sur  $\mathcal{D}$  par

$$A_0(1, z_1, 0, \dots, 0) + z_1 A_1(1, z_1, 0, \dots, 0) = 0.$$

Ainsi comme génériquement (sur le choix de  $\mathcal{D}$ ) le polynôme  $A_0(1, z_1, 0, \dots, 0)$  est de degré  $\nu + 1$ , on trouve que  $A_1(1, z_1, 0, \dots, 0)$  est de degré  $\nu$ . Or  $\omega_{0|\mathcal{D}} = A_1(1, z_1, 0, \dots, 0) dz_1$ , donc  $\omega_{0|\mathcal{D}}$  s'annule en  $\nu$  points, i.e. le nombre de points de tangence entre le feuilletage et la droite  $\{z_2 = \dots = z_n = 0\}$  est  $\nu$ .

La proposition suivante contrôle le degré d'un  $\mathcal{L}$ -feuilletage  $\mathcal{F}$  associé à une sous-algèbre  $\mathcal{L} \subset \chi(\mathbf{CP}(n))$  ainsi que la dimension de  $\mathcal{L}$  en degré maximal :

**PROPOSITION 1.4.** *Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré  $\nu$  sur  $\mathbf{CP}(n)$  défini par une 1-forme  $\omega$ . Alors  $\nu \leq n - 1$ . De plus, si  $\nu = n - 1$ , alors  $\dim \mathcal{L} = n - 1$ .*

**DÉMONSTRATION.** Soient  $X_1, \dots, X_s$  une base de  $\mathcal{L}$  et  $\tilde{X}_k \in \chi(\mathbf{C}^{n+1})$  des relevés des  $X_k$ . Soit  $m$  un point générique, i.e.  $\dim \mathcal{L}(m) = n - 1$ . On peut supposer, quitte à réindicer, que l'espace vectoriel engendré par

$$R(\tilde{m}), \tilde{X}_1(\tilde{m}), \dots, \tilde{X}_{n-1}(\tilde{m})$$

(où  $\pi(\tilde{m}) = m$ ) est de dimension  $n$ , de sorte que la 1-forme  $\bar{\omega}$  définie par

$$i_R i_{\tilde{X}_1} \dots i_{\tilde{X}_{n-1}} dz_0 \wedge \dots \wedge dz_n$$

est homogène de degré  $n$ , non identiquement nulle et  $\ker \bar{\omega}(\tilde{m}) = \langle R(\tilde{m}), \tilde{X}_1(\tilde{m}), \dots, \tilde{X}_{n-1}(\tilde{m}) \rangle$ . Par ailleurs,  $\ker \omega(\tilde{m})$  est l'hyperplan tangent à la feuille passant par  $m$ . Ainsi si  $\tilde{m}$  est un point générique, on a  $\ker \omega(\tilde{m}) = \ker \bar{\omega}(\tilde{m})$  : les deux 1-formes  $\bar{\omega}$  et  $\omega$  sont colinéaires. Le lemme de de Rham-Saito assure l'existence d'un polynôme homogène  $f_{n-\nu-1}$  tel que  $\bar{\omega} = f_{n-\nu-1}\omega$  ; comme  $\omega$  est de degré  $\nu + 1$  et  $\bar{\omega}$  de degré  $n$ , le polynôme homogène  $f_{n-\nu-1}$  est de degré  $n - \nu - 1$  et  $n - 1 \geq \nu$ .

Supposons maintenant que  $\nu = n - 1$  ; avec les notations précédentes, on a  $f_{n-\nu-1} = f_0 \in \mathbf{C}^*$ . Par suite les champs linéaires  $R, \tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_{n-1}$  sont linéairement indépendants en tout point  $\tilde{m}$  régulier pour  $\tilde{\mathcal{F}}$  et les champs holomorphes  $X_1(m), \dots, X_{n-1}(m)$  sont linéairement indépendants en tout point  $m \in \mathbf{CP}(n) \setminus \text{Sing } \mathcal{F}$ . Soient  $X \in \mathcal{L}$  et  $m \in \mathbf{CP}(n) \setminus \text{Sing } \mathcal{F}$ , on a

$$X(m) = \sum_{k=1}^{n-1} \alpha_k(m) X_k(m)$$

où  $\alpha_k(m) \in \mathbf{C}$  et les applications  $\alpha_k$  sont holomorphes sur  $\mathbf{CP}(n) \setminus \text{Sing } \mathcal{F}$ . Comme  $\text{codim}_{\mathbf{C}} \text{Sing } \mathcal{F} \geq 2$ , le théorème de prolongement de Hartogs assure que les  $\alpha_k$  se prolongent à  $\mathbf{CP}(n)$  tout entier et sont donc constants.  $\square$

On en déduit le

**COROLLAIRE 1.5.** *Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$  associé à  $\mathcal{L} \subset \chi(\mathbf{CP}(3))$ . Alors  $\mathcal{L}$  est abélienne de dimension 2 ou isomorphe à l'algèbre du groupe des transformations affines  $\{z \mapsto az + b\}$ .*

Ainsi on déduira la classification des  $\mathcal{L}$ -feuilletages de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$  de celle de certaines sous-algèbres de Lie de dimension 2 de  $sl(4; \mathbf{C})$ .

**DÉFINITION.** Un feuilletage  $\mathcal{F}$  décrit en coordonnées homogènes par la 1-forme  $\omega$  possède un facteur intégrant s'il existe un polynôme homogène  $P$  non trivial tel que la 1-forme  $\frac{\omega}{P}$  soit fermée.

**PROPOSITION 1.6.** ([5]) *Soit  $\mathcal{F}$  un feuilletage sur  $\mathbf{CP}(n)$  donné en coordonnées homogènes par la 1-forme  $\omega$ . Supposons que  $\mathcal{F}$  possède un facteur intégrant  $P$  ; si  $P = P_1^{n_1+1} \dots P_s^{n_s+1}$  est la décomposition de  $P$  en facteurs irréductibles, alors*

$$\begin{aligned} \frac{\omega}{P_1^{n_1+1} \dots P_s^{n_s+1}} &= \sum_{k=1}^s \lambda_k \frac{dP_k}{P_k} + d\left(\frac{H}{P_1^{n_1} \dots P_s^{n_s}}\right) \\ &= d\left(\sum_{k=1}^s \lambda_k \log P_k + \frac{H}{P_1^{n_1} \dots P_s^{n_s}}\right) \end{aligned}$$

où  $\lambda_k \in \mathbf{C}$  et  $H$  désigne un polynôme homogène.

Bien que techniquement difficile, l'énoncé est « essentiellement » le théorème de décomposition en éléments simples des fractions rationnelles à une variable. Il y a un énoncé analogue pour les germes holomorphes ([5]).

REMARQUES. (i) Le feuilletage associé à la forme  $\frac{\omega}{P}$  a en général des singularités, les croisements  $P_j = P_k = 0$  notamment. Les feuilles de ce feuilletage sont les composantes connexes des niveaux de la fonction multivaluée

$$\sum_{k=1}^s \lambda_k \log P_k + \frac{H}{P_1^{n_1} \dots P_s^{n_s}}$$

(ii) Si les  $\lambda_k$  sont tous nuls, le feuilletage  $\mathcal{F}$  admet une intégrale première rationnelle  $H/P_1^{n_1} \dots P_s^{n_s}$ . Il suit de l'identité d'Euler  $i_R \omega = 0$  que  $H/P_1^{n_1} \dots P_s^{n_s}$  est homogène de degré 0. Finalement,  $\deg(P) = \deg \omega + 1 = \nu + 2$ .

(iii) Si l'un des  $\lambda_k$  est non nul, l'égalité

$$\frac{\omega}{P} = \sum_{k=1}^s \lambda_k \frac{dP_k}{P_k} + d\left(\frac{H}{P_1^{n_1} \dots P_s^{n_s}}\right)$$

conduit aussi à  $\deg(P) = \deg \omega + 1 = \nu + 2$ .

(iv) Il suit de (ii) et (iii) que  $\frac{\omega}{P}$  définit une 1-forme fermée rationnelle sur  $\mathbf{CP}(n)$ .

(v) Si le polynôme  $P$  est réduit, i.e.  $n_k = 0$  pour tout  $k \in \{1, \dots, s\}$ , alors toujours pour des raisons d'homogénéité le polynôme  $H$  est constant et on peut prendre  $H = 0$ . On dit alors que le feuilletage  $\mathcal{F}$  défini par  $\frac{\omega}{P} = d\left(\sum_{k=1}^s \log P_k\right)$

est logarithmique; l'identité d'Euler implique que  $\sum_{k=1}^s \lambda_k \deg(P_k) = 0$ .

(vi) A l'intégrale première  $\sum_{k=1}^s \lambda_k \log P_k + \frac{H}{P_1^{n_1} \dots P_s^{n_s}}$  on préfère parfois son exponentielle  $\prod_{k=1}^s P_k^{\lambda_k} \exp\left(\frac{H}{P_1^{n_1} \dots P_s^{n_s}}\right)$ .

La proposition qui suit est bien classique [5] :

**PROPOSITION 1.7.** *Soient  $\mathcal{F}$  un feuilletage sur  $\mathbf{CP}(n)$  décrit par une 1-forme  $\omega$ ,  $X \in \chi(\mathbf{CP}(n))$  et  $\exp(tX)$  le flot de  $X$ . Supposons que  $X$  ne soit pas tangent à  $\mathcal{F}$  et que  $\mathcal{F}$  soit invariant par  $X$ , i.e.  $(\exp tX)^*\mathcal{F} = \mathcal{F}$ . Alors  $i_{\tilde{X}}\omega$  est un facteur intégrant de  $\mathcal{F}$ , où  $\tilde{X}$  est un relevé de  $X$ .*

**DÉMONSTRATION.** Les hypothèses se traduisent par :

(i)  $i_{\tilde{X}}\omega = P$  est un polynôme homogène non trivial

(ii)  $(\exp t\tilde{X})^*\omega \wedge \omega = 0$

En dérivant (ii), on obtient

$$(L_{\tilde{X}}\omega) \wedge \omega = 0$$

ou encore

$$(i_{\tilde{X}}d\omega + d(i_{\tilde{X}}\omega)) \wedge \omega = 0$$

Comme  $\omega$  est intégrable, on a

$$i_{\tilde{X}}(\omega \wedge d\omega) = 0$$

soit

$$(i_{\tilde{X}}\omega)d\omega + i_{\tilde{X}}d\omega \wedge \omega = 0$$

qui équivaut à

$$d\left(\frac{\omega}{P}\right) = 0$$

□

**DÉFINITION.** Un champ de vecteurs  $X$  comme ci-dessus est appelé symétrie de  $\mathcal{F}$ .

Via la proposition précédente, on peut établir qu'un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de  $\mathbf{CP}(n)$  possède un facteur intégrant, c'est-à-dire est défini par une 1-forme fermée rationnelle :

**THÉORÈME 1.8.** *Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de  $\mathbf{CP}(n)$ . Alors  $\mathcal{F}$  possède un facteur intégrant. Plus précisément, on a l'alternative :*

(i) le feuilletage  $\mathcal{F}$  possède une symétrie

(ii) le feuilletage  $\mathcal{F}$  possède une intégrale première rationnelle non triviale.

En particulier  $\mathcal{F}$  est défini par une 1-forme fermée rationnelle sur  $\mathbf{CP}(n)$ .

**DÉMONSTRATION.** On introduit les deux sous-groupes de  $\text{Aut } \mathbf{CP}(n)$  suivants :

$$G_1 := \langle \exp tY, Y \in \mathcal{L} \rangle$$

le groupe analytique engendré par les flots des champs tangents à  $\mathcal{F}$  et

$$G_2 := \{\phi \in \text{Aut } \mathbf{CP}(n), \phi^* \mathcal{F} = \mathcal{F}\} = \{\phi \in \text{Aut } \mathbf{CP}(n), \phi^* \omega \wedge \omega = 0\}$$

où  $\omega$  définit le feuilletage  $\mathcal{F}$ .

Alors que  $G_2$  est un sous-groupe algébrique de  $\text{Aut } \mathbf{CP}(n)$ , il se peut que  $G_1$  ne le soit pas. On a l'inclusion  $G_1 \subset G_2$ . Notons  $G_1^Z$  l'adhérence de Zariski de  $G_1$  et  $G_2^0$  la composante connexe neutre de  $G_2$ ; comme  $G_1$  est connexe,  $G_1^Z$  aussi et  $G_1^Z \subset G_2^0$ . On a l'alternative

- $\mathcal{L}ie G_1 \subsetneq \mathcal{L}ie G_1^Z \subset \mathcal{L}ie G_2$
- $G_1 = G_1^Z$ .

Dans le premier cas, si  $X \in \mathcal{L}ie G_1^Z \setminus \mathcal{L}ie G_1$ , alors  $X$  est non tangent à  $\mathcal{F}$  (maximalité de  $\mathcal{L}$ ) et  $\exp tX \in G_2^0$ . Par suite  $X$  est une symétrie.

Dans le deuxième cas, le groupe  $G_1$  est algébrique; comme il agit sur  $\mathbf{CP}(n)$  par action algébrique, l'adhérence ordinaire de toute orbite  $G_1.m$  est algébrique comme adhérence de l'image d'un morphisme algébrique. Par suite toute feuille de  $\mathcal{F}$  est d'adhérence algébrique. Il résulte du théorème de Darboux-Jouanolou ([5], [9]) que  $\mathcal{F}$  possède une intégrale première rationnelle.  $\square$

Ainsi énoncé ce théorème est semblable à un résultat de J. Pereira et P. Sánchez ([12]). Il se généralise comme suit (la preuve est analogue) :

**THÉORÈME 1.9.** *Un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de codimension un d'une variété algébrique est défini par une forme fermée rationnelle.*

**LEMME 1.10.** *Soient  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(n)$  décrit par une 1-forme  $\omega$ ,  $X$  une symétrie et  $Y$  un champ tangent au feuilletage. Alors  $i_{[X,Y]}\omega = 0$ , i.e.  $[X,Y]$  est tangent au feuilletage  $\mathcal{F}$ .*

**DÉMONSTRATION.** En un point régulier, le théorème de Frobenius assure que  $\omega$  s'écrit  $udx_0$  où  $u$  est une unité et  $x_0$  une submersion. Si on complète les coordonnées à l'aide de  $x_1, \dots, x_n$  alors les champs locaux tangents à  $\omega$  sont engendrés par  $\frac{\partial}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}$ . Comme  $X = \sum_{k=0}^n X_k \frac{\partial}{\partial x_k}$  est une symétrie, la 1-forme  $\frac{\omega}{i_X \omega}$  est fermée. Or  $i_X \omega = uX_0$ ; donc  $\frac{dx_0}{X_0}$  est fermée, i.e :

$$X = \ell(x_0) \frac{\partial}{\partial x_0} + \sum_{k=1}^n X_k \frac{\partial}{\partial x_k}$$

Puisque le champ  $Y$  étant tangent au feuilletage, il s'écrit  $\sum_{k=1}^n Y_k \frac{\partial}{\partial x_k}$ ; alors

$$[X, Y] = [\ell(x_0) \frac{\partial}{\partial x_0} + \sum_{k=1}^n X_k \frac{\partial}{\partial x_k}, \sum_{k=1}^n Y_k \frac{\partial}{\partial x_k}]$$

et  $[X, Y]$  annule  $\omega$ . □

REMARQUE. Le lemme précédent est évidemment de nature locale.

COROLLAIRE 1.11. *Soient  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(n)$  et  $X$  un champ de vecteurs non tangent au feuilletage  $\mathcal{F}$ . Le champ  $X$  est une symétrie de  $\mathcal{F}$  si et seulement si  $[X, \mathcal{L}] \subset \mathcal{L}$ .*

DÉMONSTRATION. Soit  $Y \in \mathcal{L}$ , le lemme 1.10 assure que si  $X$  est une symétrie alors le champ  $[X, Y]$  est tangent au feuilletage  $\mathcal{F}$ . Par maximalité de l'algèbre  $\mathcal{L}$ , le crochet  $[X, Y] \in \mathcal{L}$ .

Réciproquement, le théorème de Frobenius assure que localement au voisinage d'un point régulier  $m$  la 1-forme  $\omega$  décrivant le feuilletage s'écrit  $udx_0$ . L'algèbre  $\tilde{\mathcal{L}} = \mathcal{L}' \oplus \mathbf{C}R$  est de dimension ponctuelle  $n$ . Le module des champs tangents en  $m$  au feuilletage coïncide avec le module engendré par  $\frac{\partial}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}$  et avec le module engendré par  $\tilde{\mathcal{L}}$ . Soit  $\tilde{X}$  un relevé de  $X$ ; la condition  $[\tilde{X}, \tilde{\mathcal{L}}] \subset \tilde{\mathcal{L}}$  implique que pour tout champ  $Y$  local tangent à  $\tilde{\mathcal{F}}$ , le champ  $[\tilde{X}, Y]$  est tangent au feuilletage. En particulier, c'est le cas pour chaque  $[\tilde{X}, \frac{\partial}{\partial x_i}]$ ,  $i \geq 1$ . Supposons que le champ  $\tilde{X}$  s'écrive

$$X_0 \frac{\partial}{\partial x_0} + \dots + X_n \frac{\partial}{\partial x_n}$$

Comme la 1-forme  $\omega$  annule

$$[X, \frac{\partial}{\partial x_k}] = -\frac{\partial X_0}{\partial x_k} \frac{\partial}{\partial x_0} + \dots$$

on a  $-\frac{\partial X_0}{\partial x_k} = 0$  pour tout  $k \geq 1$ ; on note puisque  $X$  n'est pas tangent à  $\tilde{\mathcal{F}}$  que  $X_0 = \ell(x_0) \neq 0$ . Ainsi  $\frac{\omega}{i_X \omega} = \frac{dx_0}{\ell(x_0)}$  est fermée, ce qui implique que  $X$  est une symétrie. □

Les théorèmes qui suivent proposent un procédé de construction en cascade :

THÉORÈME 1.12. *Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré  $\nu$  sur  $\mathbf{CP}(n)$  défini en coordonnées homogènes sur  $\mathbf{C}^{n+1}$  par la 1-forme  $\omega$  de degré  $\nu + 1$ . Supposons que le  $\mathcal{L}$ -feuilletage  $\mathcal{F}$  n'ait pas d'intégrale première rationnelle, alors  $\tilde{\mathcal{F}}$  a une symétrie linéaire  $Z$  sur  $\mathbf{C}^{n+1}$ . Cette symétrie induit un facteur intégrant  $P$  de degré  $\nu + 2$  qui définit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré  $\leq \nu + 1$  sur  $\mathbf{C}^{n+1}$  que l'on peut prolonger à  $\mathbf{CP}(n + 1)$ .*

DÉMONSTRATION. Soit  $X \in \mathcal{L}'$  ; puisque  $P$  est un facteur intégrant de  $\omega$  on a

$$i_X(d\omega - \frac{dP}{P} \wedge \omega) = 0$$

et comme  $X \in \mathcal{L}'$ , on a  $i_X d\omega = i_X \omega = 0$ . Par conséquent, on obtient  $i_X dP = 0$ .

Soit  $G \subset \mathrm{GL}(n+1; \mathbf{C})$  le groupe analytique de  $\mathcal{L}'$ . Ce groupe n'est pas algébrique sinon les feuilles de  $\mathcal{F}$  seraient algébriques et par le théorème de Darboux-Jouanolou, le feuilletage  $\mathcal{F}$  admettrait une intégrale première rationnelle ce qui est exclu. On considère alors  $G^Z$  l'adhérence de Zariski de  $G$  ; on a  $\dim \mathcal{L}ie G < \dim \mathcal{L}ie G^Z$ . Soit  $G^P$  le groupe algébrique défini par

$$G^P = \{h \in \mathrm{GL}(n+1; \mathbf{C}), P \circ h = P\} ;$$

pour tout  $X \in \mathcal{L}'$ , le champ  $X$  annule  $P$  donc  $P(\exp tX) = P$  autrement dit  $G \subset G^P$ . Ainsi  $G^Z \subset G^P$  et

$$\mathcal{L}' = \mathcal{L}ie G \subsetneq \mathcal{L}ie G^Z \subset \mathcal{L}ie G^P$$

Par maximalité de  $\mathcal{L}$  la dimension ponctuelle de  $\mathcal{L}ie G^P$  est  $n$  ; en effet un champ linéaire qui appartient à  $\mathcal{L}'$  en tout point générique appartient à  $\mathcal{L}'$ . Le facteur intégrant  $P$ , de degré  $\nu + 2$ , apparaît donc comme invariant d'un sous-groupe algébrique de  $\mathrm{GL}(n+1; \mathbf{C})$  à orbites génériques de dimension  $n$  ; le  $\mathcal{L}$ -feuilletage associé à  $P$  est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de codimension 1 et de degré  $\leq \nu + 1$  sur  $\mathbf{C}^{n+1}$  que l'on peut prolonger à  $\mathbf{CP}(n+1)$ .  $\square$

REMARQUE. L'inégalité  $\leq \nu + 1$  est due au fait que l'on ne suppose pas le polynôme  $P$  réduit ; si  $P = P_1^{n_1+1} \dots P_s^{n_s+1}$  est de degré  $\nu + 2$ , la 1-forme

$$P_1 \dots P_s \sum_{k=1}^s (n_k + 1) \frac{dP_k}{P_k}$$

définissant le feuilletage associé à  $P$  est de degré strictement inférieur au degré de  $P$  dès que l'un des  $n_k$  est strictement positif.

On a une réciproque lorsque  $P$  est réduit :

THÉORÈME 1.13. *Soit  $P$  un polynôme homogène réduit de degré  $k$  sur  $\mathbf{C}^{n+1}$  dont la décomposition en polynômes irréductibles s'écrit  $P_1 \dots P_s$ ,  $s \geq 2$ . Si  $P$  définit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{C}^{n+1}$ , il existe des  $\mathcal{L}$ -feuilletages sur  $\mathbf{CP}(n)$  de degré  $k - 1$  ayant pour facteur intégrant  $P$ .*

DÉMONSTRATION. On définit l'algèbre de Lie  $g$  de dimension ponctuelle  $n$  par

$$g := \{X \text{ champs linéaires, } i_X dP = 0\}.$$

Si  $X \in g$ , le flot de  $X$  est tangent aux niveaux de  $P$  et en particulier tangent à  $P^{-1}(0)$  d'où

$$X(P_k) = \mu_k(X)P_k$$

avec  $\mu_k : g \rightarrow \mathbf{C}$  linéaire. Soit  $(\lambda_k)_{k=1,\dots,s}$  satisfaisant  $\sum_{k=1}^s \lambda_k \deg(P_k) = 0$ , alors

la 1-forme  $\Omega = \sum_{k=1}^s \lambda_k \frac{dP_k}{P_k}$  définit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(n)$ . En effet, soit

$$g' = \{X \in g, \sum_{k=1}^s \lambda_k \mu_k(X) = 0\} \subset g$$

Cette algèbre de Lie tangente au feuilletage logarithmique  $\mathcal{F}_\Omega$  est de codimension 1 dans  $g$  et de dimension ponctuelle  $n - 1$ . Comme  $P$  est un polynôme, ses niveaux (excepté  $P^{-1}(0)$ ) n'adhèrent pas à l'origine donc  $R \notin g$ . L'algèbre  $\mathbf{C}R + g'$  est de dimension ponctuelle  $n$  et tangente au feuilletage  $\mathcal{F}_\Omega$ . Pour  $(\lambda_k)_{k=1,\dots,s}$  générique, la 1-forme  $\omega = P\Omega$  satisfait  $\text{codim}_{\mathbf{C}} \text{Sing } \omega \geq 2$  et  $\mathcal{F}_\Omega$  est de degré  $k - 1$ .  $\square$

REMARQUE. Si  $s = 1$ , alors  $\mu_1(X) \equiv 0$  pour tout  $X \in g$ .

Si  $s \geq 2$ , alors  $\mu_i(X) \not\equiv 0 \ \forall i \in \{1, \dots, s\}$ ; en effet, si  $\mu_i(X) \equiv 0$  on a  $X(P_i) = 0 \ \forall X \in g$ . Ainsi les feuilletages décrits par  $P_i$  et  $P$  coïncident et  $s = i = 1$ .

## 2. $\mathcal{L}$ -feuilletages avec une singularité isolée en dimension $n \geq 3$ .

Rappelons la définition d'un feuilletage à singularité isolée.

DÉFINITION. Soit  $\mathcal{F}$  un feuilletage sur un ouvert de  $\mathbf{C}^n$ . On dit que  $\mathcal{F}$  a une singularité isolée en  $m$  si  $m$  est isolé dans  $\text{Sing } \mathcal{F}$ .

On démontre de façon élémentaire que si  $\mathcal{F}$  est défini par la 1-forme  $\omega = \sum_{k=1}^n a_k dz_k$  alors  $\mathcal{F}$  est à singularité isolée en  $m$  si et seulement si le germe en  $m$  de  $\{a_1 = \dots = a_n = 0\}$  est réduit à  $\{m\}$ .

On montre ici qu'un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(n)$  ayant une singularité isolée est associé à une forme quadratique de rang maximum. Les outils nécessaires sont le théorème de Frobenius de Malgrange ([10]) ainsi que le résultat suivant d'algèbre commutative :



PROPOSITION 1.14. ([15]) Soient  $a_1, \dots, a_n$  des éléments de  $\mathcal{O}(\mathbf{C}^n, 0)$ . Les assertions suivantes sont équivalentes

- (i)  $\{a_1 = \dots = a_n = 0\} = \{0\}$
- (ii) le module des relations

$$M_a := \{(b_1, \dots, b_n) \mid \sum_{k=1}^n a_k b_k = 0, b_i \in \mathcal{O}(\mathbf{C}^n, 0)\}$$

est engendré par les relations triviales

$$b_{kj} = (0, \dots, 0, a_j, 0, \dots, 0, -a_k, 0, \dots, 0).$$

Le théorème de Frobenius singulier de Malgrange donne une condition géométrique d'existence d'intégrale première holomorphe pour un feuilletage singulier :

THÉORÈME 1.15. ([10]) Soit  $\omega$  un germe de 1-forme holomorphe intégrable en 0. Si  $\text{codim}_{\mathbf{C}} \text{Sing } \omega \geq 3$ , il existe  $f \in \mathcal{O}(\mathbf{C}^n, 0)$  et  $g \in \mathcal{O}^*(\mathbf{C}^n, 0)$  tels que  $\omega = gdf$ , i.e.  $f$  est intégrale première du feuilletage associé à  $\omega$ .

Le théorème de Malgrange est inopérant en dimension 2 : la condition  $\text{codim}_{\mathbf{C}} \text{Sing } \omega \geq 3$  ne peut être satisfaite sauf lorsque  $\omega$  n'a pas de singularité et là il s'agit du théorème de Frobenius classique.

Enonçons le théorème principal de cette partie :

THÉORÈME 1.16. Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(n)$ ,  $n \geq 3$ , ayant un point singulier isolé. Alors  $\mathcal{F}$  est de degré 1 et il existe une carte affine  $\mathbf{C}^n \subset \mathbf{CP}(n)$  telle que  $\mathcal{F}|_{\mathbf{C}^n}$  soit associé à une forme quadratique de rang maximum.

REMARQUE. L'énoncé ne dit pas que le lieu singulier est réduit à un point mais qu'il existe un point singulier isolé.

DÉMONSTRATION. Supposons que le point singulier de  $\mathcal{F}$  soit l'origine 0 d'une carte affine  $\mathbf{C}^n \subset \mathbf{CP}(n)$ . Si  $X \in \mathcal{L}$ , on sait que dans la carte affine  $\mathbf{C}^n \subset \mathbf{CP}(n)$  le champ  $X$  s'écrit

$$\sum_{k=1}^n a_k(z) \frac{\partial}{\partial z_k} + \tilde{\ell}(z)R$$

où  $\tilde{\ell}$  est linéaire, les  $a_k$  affines et  $R$  le champ radial de  $\mathbf{C}^n$ .

Le champ  $X$  s'annule en 0 sinon toute la trajectoire de  $X$  passant par 0 serait singulière pour  $\mathcal{F}$ , ce qui contredirait l'hypothèse  $\mathcal{F}$  admet une singularité isolée. Ainsi les  $a_k$  sont linéaires, i.e.  $X$  s'écrit

$$X' + \ell(X)R$$

où  $\ell : \mathcal{L} \rightarrow (\mathbf{C}^n)^*$  est linéaire et  $X'$  un champ linéaire.

Soient  $X_1, \dots, X_{n-1} \in \mathcal{L}$  tels que pour  $z$  générique, on ait

$$\dim_{\mathbf{C}} \langle X_1(z), \dots, X_{n-1}(z) \rangle = n - 1$$

La 1-forme  $\Omega$  définie par

$$i_{X_1} \dots i_{X_{n-1}} dz_1 \wedge \dots \wedge dz_n$$

est intégrable et s'écrit

$$\Omega_{n-1} + \Omega_n$$

où les  $\Omega_k$  sont homogènes de degré  $k$ ,  $\Omega_{n-1} = i_{X'_1} \dots i_{X'_{n-1}} dz_1 \wedge \dots \wedge dz_n$  et  $i_R \Omega_n = 0$ . Il se peut que  $\Omega$  s'annule sur une hypersurface et se laisse diviser par un polynôme; c'est en fait le cas. Le feuilletage  $\mathcal{F}$  est défini par une 1-forme à singularité isolée en 0; le théorème de Malgrange assure l'existence de  $f \in \mathcal{O}(\mathbf{C}^n, 0)$  telle que  $df$  définisse localement  $\mathcal{F}$  en l'origine. Si  $X = \sum_{k=1}^n b_k \frac{\partial}{\partial z_k} \in \mathcal{L}$ , alors  $X.f = i_X df = 0$ , autrement dit  $\sum_{k=1}^n b_k \frac{\partial f}{\partial z_k} = 0$ . Comme nécessairement  $df$  est à singularité isolée, la proposition 1.2.3. assure que le module des relations des  $\frac{\partial f}{\partial z_k}$  est engendré par les relations triviales; on a

$$X = \sum \mu_{kj} \left( \frac{\partial f}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_k} - \frac{\partial f}{\partial x_k} \frac{\partial}{\partial x_j} \right)$$

où  $\mu_{kj} \in \mathcal{O}(\mathbf{C}^n, 0)$ . Comme  $\dim_{\mathbf{C}} \langle X_1(z), \dots, X_{n-1}(z) \rangle = n - 1$  pour  $z$  générique, les  $X'$  ne sont pas tous identiquement nuls et puisque  $f$  a une singularité isolée à l'origine,  $f$  est non submersive. De sorte qu'en calculant le 1-jet d'un élément  $X$  générique on constate que

$$f = q + \text{termes d'ordres supérieurs}$$

où  $q$  est une forme quadratique non triviale. Comme  $\Omega \wedge df = 0$ , le lemme de de Rham-Saito assure l'existence de  $G \in \mathcal{O}(\mathbf{C}^n, 0)$  tel que

$$\Omega = \Omega_{n-1} + \Omega_n = Gdf = G(dq + \text{termes d'ordre supérieur}).$$

Remarquons que  $\Omega_{n-1} \neq 0$  sinon on aurait

$$i_R \Omega = i_R \Omega_{n-1} + i_R \Omega_n = 0$$

qui implique  $i_R df = 0$ , ce qui est absurde. Comme  $\Omega$  est d'ordre  $n - 1$  et  $dq$  d'ordre 1, l'égalité

$$\Omega = \Omega_{n-1} + \Omega_n = G(dq + \text{termes d'ordre supérieur})$$

implique que  $G$  est d'ordre  $n - 2 \geq 1$ . On en déduit que  $G$  s'annule sur une hypersurface et par conséquent  $\Omega$  aussi ; or  $\Omega$  est polynômiale donc cette hypersurface est algébrique. Ainsi  $G$  s'écrit  $UP$  avec  $U \in \mathcal{O}^*(\mathbf{C}^n, 0)$  et  $P$  un polynôme :

$$P_{n-2} + \dots + P_N$$

où les  $P_i$  sont homogènes de degré  $i$  et  $P_{n-2} \neq 0$ . Finalement  $\Omega$  s'écrit

$$\Omega = \Omega_{n-1} + \Omega_n = Gdf = PUdf = (P_{n-2} + \dots + P_N)(\omega_1 + \dots + \omega_{N'}) = P\omega$$

où les  $\omega_k$  sont des 1-formes homogènes de degré  $k$ ,  $\omega_1 = dq$  avec  $P_N$  et  $\omega_{N'}$  non nuls.

Par identification, on a

$$\begin{cases} \Omega_{n-1} = P_{n-2}dq \\ \Omega_n = P_{n-2}\omega_2 + P_{n-1}dq \\ 0 = P_{n-2}\omega_3 + P_{n-1}\omega_2 + P_Ndq \\ \vdots \\ 0 = P_N\omega_{N'} \end{cases}$$

Il en résulte que

$$\begin{cases} N + N' = n \\ 1 \leq N' \\ n - 2 \leq N \end{cases}$$

autrement dit on a l'alternative :

- $N' = 1$  et  $N = n - 1$
- $N' = 2$  et  $N = n - 2$ .

Dans le premier cas,  $P = P_{n-2} + P_{n-1}$ ,  $\omega = \omega_1$  et  $\mathcal{F}$  est un feuilletage de degré 1. Dans le second cas,  $P = P_{n-2}$  et  $\omega = \omega_1 + \omega_2$  avec  $i_R\omega_2 = 0$  car  $i_R\Omega_n = 0$ . Ce qui signifie ici encore que  $\mathcal{F}$  est un feuilletage de degré 1. La classification des feuilletages de degré 1 (que nous rappelons au chapitre 3) nous permet de trouver une carte affine dans laquelle  $\omega_2 = 0$ . Ainsi  $\mathcal{F}$  est défini par  $dq$  où  $q$  est une forme quadratique nécessairement de rang maximum.  $\square$

REMARQUE. Ce théorème n'est pas correct en dimension 2 ; sur  $\mathbf{CP}(2)$  tous les feuilletages de degré 1 sont des  $\mathcal{L}$ -feuilletages et possèdent une singularité isolée (trois comptées avec multiplicité) sans toutefois être associés à une forme quadratique.

### 3. Théorèmes généraux.

On rappelle quelques résultats élémentaires classiques sur les algèbres de Lie et on présente leur traduction en terme de  $\mathcal{L}$ -feuilletages. On renvoie aux livres classiques pour ces résultats.

**PROPOSITION 1.17.** *Soit  $g$  une sous-algèbre de Lie de  $\mathcal{M}(n, \mathbf{C})$  dont tous les éléments sont semi-simples. Alors  $g$  est isomorphe à une algèbre diagonale.*

On en déduit aisément la

**PROPOSITION 1.18.** *Soit  $g$  une algèbre de Lie de champs de vecteurs linéaires sur  $\mathbf{C}^{n+1}$ . Si tous les éléments de  $g$  sont semi-simples, alors  $g$  est abélienne et  $\dim_{\mathbf{C}} g = \dim_{\mathbf{C}} g(m)$  pour  $m \in \mathbf{C}^{n+1}$  générique.*

**DÉMONSTRATION.** Par la proposition 1.17,  $g$  est isomorphe à une algèbre de matrices diagonales ; ainsi si  $X_1, \dots, X_s$  est une base de  $g$ , on peut trouver un système de coordonnées  $z_0, \dots, z_n$  tel que

$$X_k = \sum_{j=0}^n \mu_{j,k} z_j \frac{\partial}{\partial z_j}$$

Alors la matrice

$$(\mu_{j,k})_{\substack{0 \leq j \leq n \\ 1 \leq k \leq s}}$$

a pour rang  $s$  la dimension de  $g$ . Evaluons l'élément  $\sum_{k=1}^s \lambda_k X_k$  de l'algèbre  $g$  au point générique  $(1, \dots, 1)$  (chaque  $m = (m_1, \dots, m_n)$  avec  $m_j \neq 0$  se ramène à  $(1, \dots, 1)$  par un isomorphisme diagonal). Sous forme matricielle on obtient :

$$\begin{pmatrix} \sum_{k=1}^s \lambda_k \mu_{0,k} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \sum_{k=1}^s \lambda_k \mu_{n,k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} = (\mu_{j,k})_{\substack{0 \leq j \leq n \\ 1 \leq k \leq s}} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_s \end{pmatrix}$$

Par suite l'espace engendré par les  $\sum_{k=1}^s \lambda_k X_k$  évalué en  $(1, \dots, 1)$  est de dimension  $s$ . □

On obtient comme conséquence directe :

**COROLLAIRE 1.19.** *Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage (de codimension 1) sur  $\mathbf{CP}(n)$  associé à  $\mathcal{L} \subset \chi(\mathbf{CP}(n))$ . Si tous les éléments de  $\mathcal{L}$  sont semi-simples, alors  $\mathcal{F}$  est linéairement conjugué à un feuilletage logarithmique du type*

$$z_0 \dots z_n \sum_{j=0}^n \lambda_j \frac{dz_j}{z_j}, \quad \lambda_j \in \mathbf{C}$$

où les  $z_j$  sont des coordonnées.

**DÉMONSTRATION.** Soit  $\omega$  une 1-forme définissant le feuilletage  $\mathcal{F}$ . On identifie  $\mathcal{L}$  à  $\mathcal{L}'$ . La proposition 1.3.1. assure l'existence d'un système de coordonnées  $z_0, \dots, z_n$  dans lequel  $\mathcal{L}'$  est diagonale. Si  $X \in \mathcal{L}'$ ,  $X$  s'écrit

$$\sum_{j=0}^n \mu_j(X) z_j \frac{\partial}{\partial z_j}$$

où  $\mu_j(X) \in \mathbf{C}$ . Alors l'algèbre  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les champs  $X_1, \dots, X_{n-1}$  base de  $\mathcal{L}'$  et  $X_0 = R$ . Si  $(\lambda_0, \dots, \lambda_n)$  satisfait

$$\begin{cases} \sum_{j=0}^n \lambda_j = 0 \\ \sum_{j=0}^n \mu_j(X_k) \lambda_j = 0 \text{ pour } k = 1, \dots, n-1 \end{cases}$$

alors  $\bar{\omega} = z_0 \dots z_n \sum_{j=0}^n \lambda_j \frac{dz_j}{z_j}$  définit  $\mathcal{F}$ . □

**REMARQUES.** (i) Tous les  $\mathcal{L}$ -feuilletages sur  $\mathbf{CP}(n)$  associés à une algèbre abélienne ne sont pas conjugués à un feuilletage du type  $z_0 \dots z_n \sum_{j=0}^n \lambda_j \frac{dz_j}{z_j}$ .

Par exemple, les champs  $z_j \frac{\partial}{\partial z_0}$ ,  $j \neq 1$ , engendrent une algèbre  $g$  abélienne satisfaisant  $\dim g(X) \leq 1$  pour tout  $X \in g$ . Ainsi l'hypothèse tous les éléments sont semi-simples est importante pour le dernier point, exiger que l'algèbre soit abélienne ne suffit pas.

(ii) L'adhérence des feuilletages conjugués aux feuilletages logarithmiques du type

$$z_0 \dots z_n \sum_{k=0}^n \lambda_k \frac{dz_k}{z_k} \quad (**)$$

forme une composante irréductible de l'adhérence de l'ensemble des feuilletages de degré  $n - 1$  sur  $\mathbf{CP}(n)$  ([3]).

(iii) On note aussi que les limites de feuilletages définis par des 1-formes du type  $(**)$  ne sont pas nécessairement des  $\mathcal{L}$ -feuilletages ; soit  $\mathcal{F}$  le feuilletage sur  $\mathbf{C}^4 = \{z_0, z_1, z_2, z_3\}$  décrit par la 1-forme

$$\omega = z_0 z_1 (z_1 - z_0) z_3 \left( \kappa_0 \frac{dz_0}{z_0} + \kappa_1 \frac{dz_1}{z_1} + \kappa_2 \frac{d(z_1 - z_0)}{z_1 - z_0} + \kappa_3 \frac{dz_3}{z_3} \right)$$

avec  $\sum_{i=0}^3 \kappa_i = 0$ . On remarque que  $\omega$  apparaît comme  $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \omega_\varepsilon$  où

$$\omega_\varepsilon = z_0 z_1 (\varepsilon z_2 + z_1 - z_0) z_3 \left( \kappa_0 \frac{dz_0}{z_0} + \kappa_1 \frac{dz_1}{z_1} + \kappa_2 \frac{d(\varepsilon z_2 + z_1 - z_0)}{z_1 - z_0} + \kappa_3 \frac{dz_3}{z_3} \right)$$

avec  $\sum_{i=0}^3 \kappa_i = 0$  et donc  $\mathcal{F}$  est limite des  $\mathcal{L}$ -feuilletages  $\mathcal{F}_\varepsilon$ . On peut montrer que  $\omega$  ne définit pas un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de la façon suivante ; si

$$\begin{aligned} \varphi : \mathbf{C} &\rightarrow \mathbf{C}^4 \\ z &\mapsto (\varphi_0(z), \varphi_1(z), \varphi_2(z), \varphi_3(z)) \end{aligned}$$

est une application entière qui évite les hyperplans  $z_0 = 0$ ,  $z_1 = 0$  et  $z_0 = z_1$ , il résulte du théorème de Picard qu'il existe une relation non triviale

$$a_0 \varphi_0 + a_1 \varphi_1 = 0, \quad a_i \in \mathbf{C}$$

En appliquant cette remarque aux flots des champs linéaires tangents à  $\omega$ , on constate que la condition de dimension ponctuelle trois ne peut être réalisée.

On rappelle la

DÉFINITION. Soit  $g$  une algèbre de Lie, on note  $(g_i)_{i \in \mathbb{N}}$  la suite définie par

$$g_0 = g, \quad g_{i+1} = [g_i, g_i]$$

On dit que  $g$  est résoluble si  $g_p = \{0\}$  pour un certain  $p$ .

Rappelons aussi le théorème de triangulation des algèbres de Lie résolubles :

THÉORÈME 1.20. *Toutes les algèbres de Lie complexes résolubles de matrices  $g$  sont triangulables, i.e. il existe une matrice inversible  $P$  telle que  $PgP^{-1}$  soit triangulaire.*

DÉFINITION. Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(n)$ . On dit que  $\mathcal{L}$  est régulière si pour tout point  $m \in \mathbf{CP}(n) \setminus \text{Sing } \mathcal{F}$  la dimension ponctuelle de  $\mathcal{L}$  en  $m$  est  $n - 1$ .

On remarque qu'un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré maximal  $n - 1$  est nécessairement régulier.

On déduit de 1.20 le :

THÉORÈME 1.21. *Soit  $\mathcal{F}$  un feuilletage sur  $\mathbf{CP}(n)$  associé à  $\mathcal{L} \subset \chi(\mathbf{CP}(n))$  régulière. Si  $\mathcal{L}$  est résoluble, alors  $\mathcal{F}$  possède un hyperplan invariant  $\mathcal{H}$ . En particulier, il existe une carte affine  $\mathbf{C}^n \simeq \mathbf{CP}(n) \setminus \mathcal{H}$  dans laquelle les éléments de  $\mathcal{L}$  sont affines.*

DÉMONSTRATION. L'algèbre  $\mathcal{L}'$  est une algèbre de Lie résoluble isomorphe à une sous-algèbre de  $\mathcal{M}(n + 1, \mathbf{C})$ . D'après le théorème 1.20 cette algèbre est triangulable et admet donc pour hyperplan invariant  $\tilde{\mathcal{H}} := \{z_n = 0\}$ , où  $\{z_0, \dots, z_n\}$  est un système de coordonnées triangularisant de  $\mathbf{C}^{n+1}$ . Puisque  $\mathcal{L}$  est régulière, en un point générique  $m$  de  $\tilde{\mathcal{H}}$  la dimension ponctuelle de  $\mathcal{L}'$  est  $n - 1$ , et  $\tilde{\mathcal{H}}$  est invariant par le feuilletage; d'où l'existence via la projection canonique  $\pi : \mathbf{C}^{n+1} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbf{CP}(n)$  d'un hyperplan invariant pour  $\mathcal{F}$ .

Enfin, on montre facilement que si le feuilletage  $\mathcal{F}$  admet un hyperplan invariant  $\mathcal{H}$ , alors dans la carte affine  $\mathbf{CP}(n) \setminus \mathcal{H}$  les champs tangents à  $\mathcal{F}$  sont affines.  $\square$

L'hypothèse de régularité est nécessaire. Nous détaillerons en 5.1.4 l'exemple d'un feuilletage de degré deux sur  $\mathbf{CP}(4)$  ayant une intégrale première de type  $\frac{Q_1}{Q_2}$ ,  $Q_i$  quadratique, associé à une algèbre de Lie résoluble non régulière maximale; l'algèbre possède un hyperplan invariant, le feuilletage non.

On rappelle aussi les

DÉFINITIONS. 1) Soit  $g$  une algèbre de Lie; il existe un unique idéal résoluble noté  $\mathcal{R}(g)$  appelé radical de  $g$  contenant tous les idéaux résolubles de  $g$ .

2) Une algèbre  $g$  est semi-simple si elle ne contient pas d'idéal résoluble non trivial ce qui est équivalent à  $\mathcal{R}(g) = \{0\}$ .

Il est assez naturel de regarder les  $\mathcal{L}$ -feuilletages associés aux algèbres semi-simples :

**THÉORÈME 1.22.** *Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage associé à la sous-algèbre  $\mathcal{L} \subset \chi(\mathbf{CP}(n))$ . Si  $\mathcal{L}$  est semi-simple, ou plus généralement si  $[\mathcal{L}, \mathcal{L}] = \mathcal{L}$ , alors  $\mathcal{F}$  possède une intégrale première rationnelle.*

**DÉMONSTRATION.** Comme d'habitude on relève  $\mathcal{L}$  à  $\mathbf{C}^{n+1}$  en  $\mathcal{L}'$ . Le feuilletage  $\mathcal{F}$  possède un facteur intégrant  $P = P_1^{n_1+1} \dots P_s^{n_s+1}$ , avec  $\gcd(P_1, \dots, P_s) = 1$ , i.e.

$$\frac{\omega}{P} = \sum_{k=1}^s \lambda_k \frac{dP_k}{P_k} + d \left( \frac{H}{P_1^{n_1} \dots P_s^{n_s}} \right)$$

où  $\omega$  définit  $\mathcal{F}$ . Si tous les  $\lambda_i$  sont nuls, le feuilletage  $\mathcal{F}$  possède une intégrale première rationnelle; si ce n'est pas le cas supposons par exemple que  $\lambda_1 \neq 0$ . Soit  $X \in \mathcal{L}'$ ; le champ  $X$  est tangent à  $\tilde{\mathcal{F}}$  et par suite tangent aux hypersurfaces invariantes par  $\tilde{\mathcal{F}}$ . Or le lieu des zéros de  $P_k$  en est une pour  $k = 1, \dots, s$ ; ceci se traduit par :

$$X(P_k) = i_X dP_k = \mu_k(X) P_k.$$

A priori  $\mu_k(X) \in \mathcal{O}(\mathbf{C}^{n+1}, 0)$  mais  $P_k$  et  $X(P_k)$  sont homogènes de même degré donc  $\mu_k(X) \in \mathbf{C}$ . On constate que si  $X$  est un commutateur, i.e. si  $X$  s'écrit  $[Y, Z]$  avec  $Y, Z \in \mathcal{L}'$ , alors  $\mu_k(X) = 0$ . En fait chaque  $\mu_k : \mathcal{L}' \rightarrow \mathbf{C}$  est un morphisme d'algèbres de Lie donc trivial puisque  $[\mathcal{L}', \mathcal{L}'] = \mathcal{L}'$ . Il se trouve que  $P$  admet au moins deux facteurs premiers entre eux dans sa décomposition, i.e.  $s \geq 2$ . En effet supposons que  $P = P_1^{n_1+1}$ , alors

$$\frac{\omega}{P} = \frac{\omega}{P_1^{n_1+1}} = \lambda_1 \frac{dP_1}{P_1} + d \left( \frac{H}{P_1^{n_1}} \right)$$

En particulier  $\deg d \left( \frac{H}{P_1^{n_1}} \right) = -1$  et  $\deg \frac{H}{P_1^{n_1}} = 0$ . L'égalité  $\deg \frac{H}{P_1^{n_1}} = 0$  et l'identité d'Euler impliquent que  $\lambda_1 \deg P_1 = 0$ , i.e.  $\lambda_1 = 0$  ce qui est exclu, ou  $\deg P_1 = 0$  ce qui est encore exclu.

Finalement pour chaque  $X \in \mathcal{L}$  on a  $X(P_1) = X(P_2) = 0$  et si  $\nu_i = \deg P_i$ , la fonction rationnelle  $\frac{P_1^{\nu_2}}{P_2^{\nu_1}}$  est homogène non constante de degré 0 donc passe à  $\mathbf{CP}(n)$  et est intégrale première de tout élément de  $\mathcal{L}$  donc de  $\mathcal{F}$ .  $\square$

**REMARQUES.** (i) La construction précédente donne une « construction à deux branches éventuellement multiples » : un  $\mathcal{L}$ -feuilletage associé à une algèbre  $\mathcal{L}$  satisfaisant  $[\mathcal{L}, \mathcal{L}] = \mathcal{L}$  admet une intégrale première du type  $\frac{P_1^{\nu_2}}{P_2^{\nu_1}}$  avec  $P_1$  et  $P_2$  deux polynômes irréductibles et  $\nu_i = \deg P_i$ . On peut en effet lorsque les  $\lambda_i$  sont nuls adapter le raisonnement précédent.

(ii) Dans le cas où  $\mathcal{L}$  est semi-simple, on sait que  $\mathcal{L}$  s'intègre en un groupe algébrique ce qui donne immédiatement le résultat. En fait l'énoncé donne plus que le cas semi-simple et donne le (i) de la remarque qui a un intérêt en soi.



**THÉORÈME 1.23.** *Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(n)$  décrit par la 1-forme  $\omega$ . Si tous les éléments de  $\mathcal{L}$  sont nilpotents, alors  $\mathcal{F}$  possède une intégrale première rationnelle.*

**DÉMONSTRATION.** Comme toujours on relève l'algèbre  $\mathcal{L}$  à  $\mathbf{C}^{n+1}$  en l'algèbre  $\mathcal{L}'$ . Puisque tous les éléments de  $\mathcal{L}$  sont nilpotents,  $\mathcal{L}'$  est nilpotente et après triangulation les hyperplans  $z_n = \text{cte}$  sont invariants par les éléments de  $\mathcal{L}'$ . Par conséquent, les feuilles du feuilletage  $\mathcal{F}'$  associé à  $\mathcal{L}'$  sont contenues dans les hyperplans  $z_n = \text{cte}$  et sont, puisque  $\mathcal{L}'$  produit un feuilletage de codimension 2, de codimension 1 dans ces hyperplans. La forme  $d\omega|_{z_n=\text{cte}}$  est nulle sinon le feuilletage restreint serait de codimension 2. On a ainsi l'égalité  $d\omega \wedge dz_n = 0$  qui conduit à  $d(\omega \wedge dz_n) = 0$ ; autrement dit  $\omega$  est fermée dans les fibres  $z_n = \text{cte}$  donc par le théorème de Poincaré exacte dans ces fibres. Par suite, la 1-forme  $\omega$  s'écrit  $\alpha dz_n + dH$ . Par ailleurs, l'égalité  $\deg H = \deg \alpha + 1 = \deg \omega + 1$  et l'identité d'Euler  $\alpha z_n + H \deg H = 0$  impliquent que  $H = -\frac{\alpha z_n}{\deg \omega + 1}$ ; donc la 1-forme  $\omega$  s'écrit

$$(\deg \omega) \alpha dz_n - z_n d\alpha$$

Ainsi le feuilletage  $\mathcal{F}$  admet  $\frac{\alpha}{z_n \deg \omega}$  comme intégrale première.  $\square$

**REMARQUE.** Dans la carte affine  $z_n = 1$  le feuilletage admet pour intégrale première polynomiale  $\alpha$ .



## CHAPITRE 2

### Exemples.

#### 1. Principe de construction d'exemples.

On va décrire un principe qui permet de construire des  $\mathcal{L}$ -feuilletages à partir d'exemples classiques venant en particulier de la théorie des invariants et des actions de  $\mathbf{C}^{n-1}$  sur  $\mathbf{C}^n$ .

On note  $E_k := \mathbf{C}^{n_k+1}$ ,  $n_k \in \mathbb{N}^*$ , et  $\mathbf{P}(E_k) \simeq \mathbf{CP}(n_k)$ ,  $k = 1, \dots, q$ . Sur  $\mathbf{P}(E_k)$ , on se donne un  $\mathcal{L}$ -feuilletage  $\mathcal{F}_k$  associé à une algèbre de Lie  $\mathcal{L}_k$  de champs de vecteurs linéaires ; pour  $m_k \in \mathbf{P}(E_k)$ , générique, on a

$$\dim \mathcal{L}_k(m_k) = n_k - 1$$

On a vu que chaque  $\mathcal{F}_k$  est défini par des formes rationnelles fermées

$$\frac{\omega_k}{P_k} = \sum_{j=1}^{s_k} \lambda_{k,j} \frac{dP_{k,j}}{P_{k,j}} + d \left( \frac{H_k}{P_{k,1}^{n_{k,1}} \dots P_{k,s_k}^{n_{k,s_k}}} \right)$$

avec les conditions  $\sum_{j=1}^{s_k} \lambda_{k,j} \deg P_{k,j} = 0$  et  $\deg(H_k) = \sum_{\ell=1}^{s_k} n_{k,\ell} \deg P_{k,\ell}$ .

Posons  $N = \sum_{k=1}^q n_k$  ; on considère sur  $E_1 \oplus \dots \oplus E_q \simeq \mathbf{C}^{N+q}$  le feuilletage  $\mathcal{F}_\mu$  associé à la 1-forme fermée

$$\frac{\Omega}{P} = \sum_{k=1}^q \mu_k \frac{\omega_k}{P_k}$$

où  $P = \prod_{k=1}^q P_k$  et les  $\mu_k \in \mathbf{C}$  sont non tous nuls. On remarque que  $\mathcal{F}_\mu$  descend sur  $\mathbf{CP}(N+q-1)$ . En effet, si  $R_k$  désigne le champ radial sur  $E_k$ , alors  $R = \sum_{k=1}^q R_k$  est le champ radial sur  $E_1 \oplus \dots \oplus E_q$  ; comme chaque  $\omega_k$  annule  $R_j$  pour  $j = 1, \dots, q$ , la 1-forme  $\Omega$  annule  $R$ .

PROPOSITION 2.1. *Si chaque  $\mathcal{F}_k$  possède une symétrie  $X_k$ , alors le feuilletage  $\mathcal{F}_\mu$  descend en un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{P}(E_1 \oplus \dots \oplus E_q)$ .*

DÉMONSTRATION. Soit  $\tilde{m} = (\tilde{m}_1, \dots, \tilde{m}_q) \in E_1 \oplus \dots \oplus E_q$  un point générique. La sous-algèbre  $\mathcal{L}^0 = \tilde{\mathcal{L}}_1 \oplus \dots \oplus \tilde{\mathcal{L}}_q$  est formée de champs tangents à  $\mathcal{F}_\mu$ . On a

$$\dim \mathcal{L}^0(\tilde{m}) = \sum_{k=1}^q \dim \tilde{\mathcal{L}}_k(\tilde{m}_k) = \sum_{k=1}^q n_k = N$$

Soit  $\tilde{X}_k$  un relevé de  $X_k$  et  $P_k = i_{\tilde{X}_k} \omega_k$ . Considérons maintenant un champ  $\tilde{X}_\alpha$  de la forme

$$\tilde{X}_\alpha = \sum_{k=1}^q \alpha_k \tilde{X}_k$$

avec  $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_q) \in \mathbf{C}^q$  et  $\langle \alpha, \mu \rangle = 0$ . On a

$$i_{\tilde{X}_\alpha} \frac{\Omega}{P} = \sum_{k=1}^q \mu_k \alpha_k \frac{i_{\tilde{X}_\alpha} \omega_k}{P_k} = \sum_{k=1}^q \mu_k \alpha_k$$

On remarque que  $\tilde{X}_\alpha$  est tangent à  $\mathcal{F}_\mu$ . Soit  $\tilde{\mathcal{L}}$  l'algèbre de Lie engendrée par  $\mathcal{L}^0$  et par les champs  $\tilde{X}_\alpha$ ; l'algèbre  $\tilde{\mathcal{L}}$  est formée de champs linéaires tangents à  $\mathcal{F}_\mu$ . De plus, en un point  $\tilde{m} \in E_1 \oplus \dots \oplus E_q$  générique, on a

$$\dim \tilde{\mathcal{L}}(\tilde{m}) = \dim \mathcal{L}^0(\tilde{m}) + q - 1 = \sum_{k=1}^q n_k + q - 1 = N + q - 1$$

donc  $\mathcal{F}_\mu$  induit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage.  $\square$

Il se peut que  $\tilde{\mathcal{L}}$  ne soit pas maximale alors que tous les  $\tilde{\mathcal{L}}_k$  le sont; nous allons voir que modulo une hypothèse d'irréductibilité elle l'est.

DÉFINITION. Soit  $\mathcal{F}$  un feuilletage sur  $\mathbf{CP}(n)$  défini en coordonnées homogènes par  $\omega = \sum_{k=0}^n a_k dz_k$ . On dit que  $\mathcal{F}$  est irréductible si  $\omega$  n'annule pas de champ constant non trivial.

Remarquons que si  $\mathcal{F}$  n'est pas irréductible, alors  $\mathcal{F}$  est le pull-back linéaire d'un feuilletage  $\mathcal{F}'$  sur un  $\mathbf{CP}(\ell)$ ,  $\ell < n$ .

Soient  $\mathcal{F}_\mu$ ,  $\mathcal{F}_k$ ,  $\mathcal{L}^0$  et  $\mathcal{L}$  comme dans la proposition 2.1; on a la :

PROPOSITION 2.2. *Si chaque  $\mathcal{F}_k$  est irréductible, alors  $\tilde{\mathcal{L}}$  est maximale.*

*De plus, si on note  $g = \{\sum_{k=1}^q \alpha_k \tilde{X}_k, \langle \alpha, \mu \rangle = 0\}$ , on a  $\tilde{\mathcal{L}} = g \oplus \mathcal{L}^0$  et  $[g, \mathcal{L}^0] \subset \mathcal{L}^0$ .*

DÉMONSTRATION. Soit  $Y$  un champ de vecteurs linéaire tangent à  $\tilde{\mathcal{F}}_\mu$ . Montrons que  $Y \in \tilde{\mathcal{L}}$ ; le champ  $Y$  s'écrit

$$Y_1 + \dots + Y_q$$

où chaque  $Y_i$  est un champ linéaire sur  $E_1 \oplus \dots \oplus E_q$  et parallèle au facteur  $E_i$ . L'égalité

$$i_Y \frac{\Omega}{P} = 0$$

conduit à

$$\sum_{k=1}^q \frac{\mu_k}{P_k} i_{Y_k} \omega_k = 0$$

et à

$$\sum_{k=1}^q \frac{\mu_k}{P_k} i_{Y_k} \omega_k = 0$$

Par suite,  $i_{Y_k} \omega_k$  est divisible par  $P_k$ ; comme  $Y_k$  est linéaire, on a  $i_{Y_k} \omega_k = c_k P_k$  où  $c_k \in \mathbf{C}$  et  $\sum_{k=1}^q \mu_k c_k = 0$ . Puisque  $i_{\tilde{X}_k} \omega_k = P_k$ , le champ  $\tilde{Y}_k := Y_k - c_k \tilde{X}_k$  est annulé par  $\omega_k$ . Les composantes de  $\tilde{Y}_k$  pourraient dépendre de variables autres que celles de  $E_k$ ; montrons qu'en fait ce n'est pas le cas. Soient  $u = (u_1, \dots, u_s)$  des coordonnées de  $E_k$  et  $v = (v_{s+1}, \dots, v_r)$  des coordonnées de  $E_1 \oplus \dots \oplus E_{k-1} \oplus E_{k+1} \oplus \dots \oplus E_q$ . Le champ  $\tilde{Y}_k$  s'écrit

$$\sum_{j=1}^s a_j(u) \frac{\partial}{\partial u_j} + \sum_{j=1}^s b_j(v) \frac{\partial}{\partial u_j}$$

où les  $a_j$  et  $b_j$  sont linéaires respectivement en  $u$  et  $v$ . L'égalité  $i_{\tilde{Y}_k} \omega_k = 0$  conduit à

$$i_Z \omega_i = 0$$

où  $Z = \sum_{j=1}^s b_j \frac{\partial}{\partial u_j}$ . Pour  $v$  général fixé ceci produit un champ de vecteurs constant non nul, dès que l'un des  $b_j$  est non trivial; ce champ est tangent à  $\mathcal{F}_k$

ce qui est exclu puisque le feuilletage  $\mathcal{F}_k$  est supposé irréductible. Finalement,  $\tilde{Y}_k$  s'écrit

$$\sum_{j=1}^s a_j(u) \frac{\partial}{\partial u_j}$$

Or l'algèbre  $\tilde{\mathcal{L}}_k$  est par hypothèse maximale donc  $\tilde{Y}_k \in \tilde{\mathcal{L}}_k$ . De sorte que

$$Y = \sum_{k=1}^q Y_k = \sum_{k=1}^q c_k \tilde{X}_k + \tilde{Y}$$

avec  $\tilde{Y} = \sum_{k=1}^q \tilde{Y}_k \in \mathcal{L}^0$ .

Pour terminer il suffit de montrer que  $[\tilde{X}_k, \mathcal{L}^0] \subset \mathcal{L}^0$ ; pour cela il suffit de vérifier que les champs linéaires  $[\tilde{X}_k, Z_k]$ , où  $Z_k \in \tilde{\mathcal{L}}_k$ , annulent  $\omega_k$  et sont donc dans  $\tilde{\mathcal{L}}_k$ . Mais comme  $\tilde{X}_k$  est une symétrie linéaire de  $\mathcal{F}_k$  et  $i_{Z_k} \omega_k = 0$ , on a  $i_{[\tilde{X}_k, Z_k]} \omega_k = 0$ .  $\square$

Plus généralement on montre de la même manière le :

**PROPOSITION 2.3.** *Soit  $\omega_k$  une 1-forme intégrable homogène définissant un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{C}^{n_k}$  admettant une symétrie  $X_k$  et  $P_k = i_{X_k} \omega_k$ . Si les  $\mu_k \in \mathbf{C} \setminus \{0\}$  satisfont  $\sum_{k=1}^q \mu_k \frac{i_{R_k} \omega_k}{P_k} = 0$ , alors la 1-forme  $\Omega = P_1 \dots P_q \sum_{k=1}^q \mu_k \frac{\omega_k}{P_k}$  définit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{P}(\mathbf{C}^{n_1} \oplus \dots \oplus \mathbf{C}^{n_q})$ .*

**REMARQUES.** (i) Si  $i_{R_k} \omega_k \neq 0$ , on a une symétrie automatique  $X_k = R_k$  et dans ce cas  $i_{R_k} \frac{\omega_k}{P_k} = 1$ .

(ii) Si  $i_{R_k} \omega_k \neq 0$ , alors  $Q_k = i_{R_k} \omega_k$  et  $P_k$  sont des facteurs intégrants de  $\omega_k$ . Si la 1-forme  $\omega_k$  n'a pas d'intégrale première rationnelle, alors  $Q_k = \text{cte } P_k$ .

## 2. Exemples logarithmiques.

Les exemples logarithmiques vus en 1.3. s'obtiennent trivialement via le principe précédent.

On considère sur  $E_k = \mathbf{C}$  la 1-forme  $\omega_k = dz_k$ , le polynôme  $P_k = z_k$  et  $\mathcal{L}_k = \{0\}$ ; le « feuilletage »  $\mathcal{F}_k$  en points est décrit par la 1-forme

$$\frac{\omega_k}{P_k} = \frac{dz_k}{z_k}$$

On construit sur  $E_1 \oplus \dots \oplus E_{n+1}$  le feuilletage logarithmique décrit par la 1-forme

$$z_1 \dots z_{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} \mu_k \frac{dz_k}{z_k}$$

$\mu_k \neq 0$ , qui descend sur  $\mathbf{PC}^{n+1} = \mathbf{CP}(n)$  dès que  $\sum_{k=1}^{n+1} \mu_k = 0$ . On a ici  $\mathcal{L} \simeq \mathbf{C}^{n-1}$ .

Les feuilles, qui sont les composantes connexes des niveaux de la fonction multivaluée  $\sum_{k=1}^{n+1} \mu_k \log z_k$ , sont en général denses pour  $n \geq 3$ . On remarque que tout champ  $\sum_{k=1}^{n+1} \lambda_k z_k \frac{\partial}{\partial z_k}$  tel que  $\sum_{k=1}^{n+1} \lambda_k \mu_k \neq 0$  est une symétrie.

### 3. Exemples issus de formes quadratiques.

Sur  $\mathbf{C}^{n_j}$  on considère une forme quadratique  $Q_j$  de rang maximal, i.e. quitte à composer par un isomorphisme on peut supposer que  $Q_j(z) = \sum_{k=1}^{n_j} z_{j,k}^2$ .

Soit  $\mathcal{F}_j$  le  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{C}^{n_j}$  défini par la 1-forme  $dQ_j$  et associé à l'algèbre  $so(Q_j) \simeq so(n_j; \mathbf{C})$ . Le champ radial  $R_j$  de  $\mathbf{C}^{n_j}$  est une symétrie de  $\mathcal{F}_j$  : c'est l'identité d'Euler.

On construit sur  $\mathbf{C}^N = \mathbf{C}^{n_1} \times \dots \times \mathbf{C}^{n_q}$  le feuilletage décrit par

$$Q_1 \dots Q_q \sum_{j=1}^q \mu_j \frac{dQ_j}{Q_j}$$

(qui descend en un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(N-1)$  dès que  $\sum_{j=1}^q \mu_j = 0$ ). La proposition 2.2 assure que ce dernier est associé à l'algèbre

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= \left\{ \sum_{j=1}^q \kappa_j R_j, \langle \kappa, \mu \rangle = 0 \right\} \oplus so(Q_1) \oplus \dots \oplus so(Q_q) \\ &\simeq \mathbf{C}^{q-1} \oplus so(n_1; \mathbf{C}) \oplus \dots \oplus so(n_q; \mathbf{C}) \quad (\text{somme directe d'algèbres de Lie}) \end{aligned}$$

En considérant  $\mathbf{C}^N$  comme une carte affine de  $\mathbf{CP}(N)$  on constate que ce feuilletage s'étend à  $\mathbf{CP}(N)$  et que ce prolongement est associé à l'algèbre  $\mathcal{L}$ .

Si  $q \geq 3$ , les feuilles sont en général denses. Si  $\mu_j \in \mathbb{Z}$ , on obtient des exemples avec intégrales premières rationnelles.

On peut aussi coller des feuilletages logarithmiques avec des feuilletages associés à des formes quadratiques ; considérons par exemple la 1-forme

$$\omega = \frac{d(z_1^2 + z_2^2 + z_3^2)}{z_1^2 + z_2^2 + z_3^2} - \kappa \frac{dz_0}{z_0}$$

On note  $R_1 = z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_3}$ . Soit  $Z$  un champ annulant  $\omega$  ; visiblement  $Z$  s'écrit  $\mu z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + Z'$  avec  $Z' \in \langle \frac{\partial}{\partial z_1}, \frac{\partial}{\partial z_2}, \frac{\partial}{\partial z_3} \rangle$ . Alors  $Z - \mu(z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + \frac{\kappa}{2} R_1)$  annule  $\omega$  et n'a pas de composante en  $\frac{\partial}{\partial z_0}$  ; en particulier il annule

$$\frac{d(z_1^2 + z_2^2 + z_3^2)}{z_1^2 + z_2^2 + z_3^2}$$

La 1-forme  $\omega$  décrit donc un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 et de codimension 1 sur  $\mathbf{C}^4$  associé à  $\mathcal{L} = so(3; \mathbf{C}) \oplus \mathbf{C}$ . Ce feuilletage s'étend en un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(4)$  décrit par la 1-forme

$$\frac{d(z_1^2 + z_2^2 + z_3^2)}{z_1^2 + z_2^2 + z_3^2} - \kappa \frac{dz_0}{z_0} + (\kappa - 2) \frac{dz_4}{z_4}$$

#### 4. Exemples issus d'actions classiques.

On présente quelques exemples d'actions classiques qui peuvent être des bases pour le principe de construction d'exemples ; la plupart de ces exemples se trouvent dans les livres ([8], [6], [13]). Il est plus commode ici de présenter les groupes eux-mêmes que les sous-algèbres de Lie correspondantes.

**4.1. Action de  $\mathbf{PGL}(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{CP}(3)$  et construction d'un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(4)$ .** On note  $V_4$  l'ensemble des polynômes homogènes de degré trois en deux variables et de manière plus générale  $V_k$  l'ensemble des polynômes homogènes de degré  $k - 1$  en deux variables. Le groupe  $\mathbf{GL}(2, \mathbf{C})$  agit sur  $V_k$

$$g.P = P \circ g^{-1}$$

où  $P \in V_k$  et  $g \in \mathbf{GL}(2, \mathbf{C})$ . Soient  $\lambda, \mu \in \mathbf{C}^*$ , on a

$$(\lambda g).(\mu P) = \mu P\left(\frac{1}{\lambda} g^{-1}\right) = \frac{\mu}{\lambda^k} P g^{-1} = \frac{\mu}{\lambda^k} g.P$$

L'action de  $\mathbf{GL}(2, \mathbf{C})$  sur  $V_k$  induit donc une action de  $\mathbf{PGL}(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{P}(V_k) \simeq \mathbf{CP}(k - 1)$ . Or un élément de  $\mathbf{CP}(3) \simeq \mathbf{P}(V_4)$  est la donnée d'un polynôme  $P$  de degré 3 à multiplication par un scalaire près, autrement dit la donnée de trois droites vectorielles  $\Delta_1, \Delta_2$  et  $\Delta_3$  dans  $\mathbf{C}^2$  non numérotées (les zéros de



$P$ ), soit encore la donnée de trois points de  $\mathbf{CP}(1)$ . Ainsi l'action de  $\mathbf{PGL}(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{CP}(3)$  correspond à l'action de  $\mathbf{PGL}(2, \mathbf{C}) \simeq \text{Aut } \mathbf{CP}(1)$  sur les triplets de points de  $\mathbf{CP}(1)$ .

Décrivons les orbites de cette action.

On compte trois orbites : l'orbite des triplets de points distincts, l'orbite des triplets de points dont deux seulement sont confondus et l'orbite des points triples.

On commence tout d'abord par s'intéresser au sous-ensemble de  $\mathbf{CP}(3)$  correspondant aux points triples ; un point triple c'est la donnée d'un polynôme homogène  $P$  de degré 3 qui est un cube :

$$P(z_0, z_1) = (\beta z_0 - \alpha z_1)^3$$

c'est encore la donnée du point  $[\alpha : \beta] \in \mathbf{CP}(1)$ . On peut donc paramétrer les points triples par l'application

$$(\alpha, \beta) \mapsto (\beta z_0 - \alpha z_1)^3 = \beta^3 z_0^3 - 3\beta^2 \alpha z_0^2 z_1 + 3\beta \alpha^2 z_0 z_1^2 - \alpha^3 z_1^3$$

qui induit l'application

$$[\alpha : \beta] \mapsto [\beta^3 : -3\beta^2 \alpha : 3\beta \alpha^2 : -\alpha^3]$$

dont l'image est « la » cubique gauche de  $\mathbf{CP}(3)$  notée  $\Gamma$ .

Décrivons maintenant l'orbite des triplets de points formés d'un point double et d'un point simple. On considère le polynôme  $z_0^3$ , c'est le point  $m = [1 : 0 : 0 : 0] \in \Gamma$ . La tangente à  $\Gamma$  en  $m$  est donnée par

$$t \mapsto (1, 0, 0, 0) + t \frac{\partial}{\partial \alpha} (1, -3\alpha, 3\alpha^2, -\alpha^3)|_{\alpha=0} = (1, -3t, 0, 0)$$

qui correspond au polynôme  $z_0^2(z_0 - 3tz_1)$  ; pour  $t \neq 0$ , ce polynôme est le modèle à conjugaison près de tout polynôme de degré trois ayant un terme carré.

On remarque que si  $\varphi$  est un élément de  $\text{Aut } \mathbf{CP}(3)$  laissant  $\Gamma$  invariante et si  $m \in \Gamma$ , l'image par  $\varphi$  de la tangente à  $\Gamma$  en  $m$  est la droite tangente à  $\Gamma$  en  $\varphi(m)$ .

Ainsi l'orbite des polynômes, dont le lieu des zéros est une droite double et une droite simple, est l'ensemble des tangentes  $\Sigma$  à la cubique  $\Gamma$  privé de  $\Gamma$ . La surface  $\Sigma \setminus \Gamma$  est invariante sous l'action de  $\mathbf{PGL}(2, \mathbf{C})$ , elle est paramétrée par l'application

$$(\alpha, t) \mapsto (-3\alpha, 3\alpha^2, -\alpha^3) + t(-3, 6\alpha, -3\alpha^2)$$

et est de degré 4 ([8]). On vérifie facilement que dans une carte affine ad-hoc,  $\Sigma$  est isomorphe à un cylindre cuspidal  $(T, s) \mapsto (T, s^2, s^3)$ .

L'action de  $\mathbf{PGL}(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{CP}(3)$  produit une unique orbite générique  $\mathbf{CP}(3) \setminus \Sigma$  et par conséquent ne produit pas de feuilletage. Toutefois elle nous

sera utile plus loin. Par contre l'action de  $\mathrm{SL}(2, \mathbf{C})$  sur  $V_4$  admet un invariant  $\Delta$  (le discriminant). On obtient ainsi un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{C}^4$  dont une intégrale première de ce feuilletage est

$$\begin{aligned}\Delta(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) &:= \Delta(\alpha_0 z_0^3 + \alpha_1 z_0^2 z_1 + \alpha_2 z_0 z_1^2 + \alpha_3 z_1^3) \\ &= \alpha_1^2 \alpha_2^2 - 4\alpha_0 \alpha_2^3 - 4\alpha_1^3 \alpha_3 - 27\alpha_0^2 \alpha_3^2 + 18\alpha_0 \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3.\end{aligned}$$

On le prolonge de façon naturelle à  $\mathbf{CP}(4)$ . Ce feuilletage est associé à une sous-algèbre  $\mathcal{L} \subset \chi(\mathbf{CP}(4))$  isomorphe à  $\mathfrak{sl}(2, \mathbf{C})$ ; il est de degré 3.

**4.2. Action de  $\mathrm{PGL}(3, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{CP}(5)$  et construction d'un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(6)$ .** Le groupe  $\mathrm{GL}(3, \mathbf{C})$  agit sur l'espace des matrices symétriques  $\mathcal{S}ym(3, \mathbf{C}) \simeq \mathbf{C}^6$  comme suit

$$g.P = ({}^t g^{-1}) P g^{-1}$$

où  $P \in \mathcal{S}ym(3, \mathbf{C})$  et  $g \in \mathrm{GL}(3, \mathbf{C})$ . Cette action correspond à l'action naturelle de  $\mathrm{GL}(3, \mathbf{C})$  sur les formes quadratiques. Soient  $\lambda, \mu \in \mathbf{C}^*$ ; on a

$$(\lambda g).(\mu P) = \frac{\mu}{\lambda^2} ({}^t g^{-1}) P g^{-1}$$

Ainsi  $\mathrm{PGL}(3, \mathbf{C})$  agit sur  $\mathbf{P}\mathcal{S}ym(3, \mathbf{C}) \simeq \mathbf{CP}(5)$ .

Décrivons les orbites de cette action. Comme  $\mathbf{CP}(5) \simeq \{\text{coniques de } \mathbf{CP}(2)\}$ , l'étude des orbites se ramène à celles des droites doubles, des paires de droites distinctes et des coniques lisses. L'orbite des droites doubles est l'image de l'application de Véronèse

$$\begin{aligned}\mathbf{CP}(2) &\rightarrow \mathbf{CP}(5) \\ [z_0 : z_1 : z_2] &\mapsto [z_0^2 : z_1^2 : z_2^2 : z_0 z_1 : z_0 z_2 : z_1 z_2]\end{aligned}$$

appelée surface de Véronèse; l'orbite des paires de droites distinctes est la variété sécante à la surface de Véronèse (c'est l'hypersurface constituée des droites qui coupent cette surface) privée de celle-ci. Enfin l'orbite des coniques lisses est l'ouvert dense de  $\mathbf{CP}(5)$ :

$$\mathbf{CP}(5) \setminus \{\text{variété sécante à la surface de Véronèse}\}.$$

Pour obtenir un feuilletage de codimension 1 on considère comme précédemment l'action de  $\mathrm{SL}(3, \mathbf{C})$  sur  $\mathcal{S}ym(3, \mathbf{C})$ : deux matrices  $A, B \in \mathcal{S}ym(3, \mathbf{C})$  sont conjuguées si et seulement si il existe  $P \in \mathrm{SL}(3, \mathbf{C})$  telle que  ${}^t P A P = B$  c'est-à-dire si et seulement si  $\det A = \det B$ . Donc

$$\delta(z) = \det \begin{pmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \\ z_2 & z_4 & z_5 \\ z_3 & z_5 & z_6 \end{pmatrix} = z_1 z_4 z_6 - z_1 z_5^2 - z_2^2 z_6 + 2 z_2 z_3 z_5 - z_3^2 z_4$$

est un invariant de degré 3 de l'action de  $\mathrm{SL}(3, \mathbf{C})$  sur  $\mathcal{S}ym(3, \mathbf{C}) \simeq \mathbf{C}^6$ . En prolongeant  $\delta$  à  $\mathbf{CP}(6)$ , on définit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 et de codimension 1 sur  $\mathbf{CP}(6)$  dont une intégrale première est

$$\frac{z_1 z_4 z_6 - z_1 z_5^2 - z_2^2 z_6 + 2 z_2 z_3 z_5 - z_3^2 z_4}{z_0^3}$$

Ce  $\mathcal{L}$ -feuilletage est associé à l'algèbre de Lie  $\mathfrak{sl}(3, \mathbf{C})$  de dimension 8; en effet, l'algèbre  $\mathcal{L}ie \mathbf{PGL}(3, \mathbf{C}) = \mathfrak{sl}(3, \mathbf{C})$  est simple donc le morphisme

$$\mathcal{L}ie \mathbf{PGL}(3, \mathbf{C}) = \mathfrak{sl}(3, \mathbf{C}) \rightarrow \mathcal{L}ie \mathrm{Aut} \mathbf{CP}(5) = \chi(\mathbf{CP}(5))$$

est injectif et  $\chi(\mathbf{CP}(5)) \supset \mathcal{L} \simeq \mathfrak{sl}(3, \mathbf{C})$ .

Plus généralement l'action de  $\mathrm{SL}(n, \mathbf{C})$  sur  $\mathcal{S}ym(n; \mathbf{C})$  produit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré  $n-1$  et de codimension 1 sur  $\mathbf{CP}(\frac{n(n+1)}{2})$  associé à l'algèbre  $\mathfrak{sl}(n, \mathbf{C})$  dont une intégrale première est

$$\frac{\det A}{z_0^n}$$

avec  $A \in \mathcal{S}ym(n, \mathbf{C})$ .

**4.3. Action de  $\mathbf{PGL}(3, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{CP}(9)$  et construction d'un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(9)$ .** Soit  $W_4$  l'ensemble des polynômes homogènes de degré trois en trois variables. Le groupe  $\mathrm{GL}(3, \mathbf{C})$  agit sur  $W_4$

$$g.P = P \circ g^{-1}$$

où  $P \in W_4$  et  $g \in \mathrm{GL}(3, \mathbf{C})$ . Comme précédemment cette action de  $\mathrm{GL}(3, \mathbf{C})$  sur  $W_4$  se laisse projectiviser en une action de  $\mathbf{PGL}(3, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{P}(W_4) \simeq \mathbf{CP}(9)$ .

Il y a huit orbites spéciales : celle des droites triples, de l'union d'une droite double et d'une droite, de l'union de trois droites en position générale, de l'union de trois droites concourantes, d'une conique et d'une droite en position générale, d'une conique et d'une droite tangente, des cubiques cuspidales et des cubiques à point double.

Les orbites génériques sont celles des courbes elliptiques. Une courbe elliptique  $E_\lambda$  s'écrit à composition par un automorphisme près

$$z_1^2 z_2 = z_0(z_0 - z_2)(z_0 - \lambda z_2).$$

On constate que deux courbes elliptiques  $E_\lambda$  et  $E_{\lambda'}$  sont équivalentes si et seulement si les ensembles

$$\Lambda = \left\{ \lambda, \frac{1}{\lambda}, 1 - \lambda, \frac{1}{1 - \lambda}, \frac{\lambda}{1 - \lambda}, \frac{\lambda}{\lambda - 1} \right\}$$

(orbite de  $\lambda$  sous l'action de  $z \mapsto \frac{1}{z}$  et  $z \mapsto 1 - z$ ) et

$$\Lambda' = \left\{ \lambda', \frac{1}{\lambda'}, 1 - \lambda', \frac{1}{1 - \lambda'}, \frac{\lambda'}{1 - \lambda'}, \frac{\lambda'}{\lambda' - 1} \right\}$$

coïncident ; autrement dit si et seulement si  $j(\lambda) = j(\lambda')$  où  $j$  désigne la fonction

$$\lambda \mapsto 256 \frac{(\lambda^2 - \lambda + 1)^3}{\lambda^2(\lambda - 1)^2}$$

En effet,  $j(\frac{1}{\lambda}) = j(\lambda)$  et  $j(1 - \lambda) = j(\lambda)$ . La fonction  $j$  est donc bien définie sur les quadruplets de points de  $\mathbf{CP}(1)$  et induit une fonction rationnelle  $J : \mathbf{CP}(9) \dashrightarrow \mathbf{CP}(1)$  qui est la composition de  $j$  avec  $\lambda$ . Ceci est relié au fait que l'on peut voir la donnée d'une courbe elliptique comme celle d'un revêtement au dessus de  $\mathbf{CP}(1)$  ramifié en quatre points, ce que nous précisons dans le paragraphe suivant. L'adhérence de l'orbite d'une courbe elliptique est une fibre de  $J$ . C'est une hypersurface de degré 6 sauf pour les deux valeurs critiques de  $j$  : 0 et 1728 (les points critiques de  $j$ , qui sont 2,  $\frac{1}{2}$ , 1 de multiplicité 1 et  $-j$ ,  $-j^2$  de multiplicité 2, correspondent aux réseaux spéciaux  $\mathbb{Z} \oplus i\mathbb{Z}$  et  $\mathbb{Z} \oplus j\mathbb{Z}$ ).

Les orbites des cubiques singulières satisfont des conditions d'incidence ; par exemple l'adhérence de l'orbite d'une courbe elliptique contient le lieu des cubiques cuspidales.

L'action de  $\mathbf{PGL}(3, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{CP}(9)$  produit donc un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 8 et de codimension 1 sur  $\mathbf{CP}(9)$  associé à l'algèbre  $\mathcal{L} \simeq \mathfrak{sl}(3, \mathbf{C})$ . Le calcul du degré n'est pas si facile et a été effectué par J. V. Pereira ([11]) en utilisant une méthode due à Darboux. Les descriptions des feuilles et du lieu singulier s'obtiennent à partir des considérations précédentes sur les orbites.

On trouvera la formule explicite de la fonction  $J$  dans le livre de Dolgachev [6] page 160.

**4.4. Action de  $\mathbf{PGL}(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{CP}(4)$ .** Comme on l'a dit précédemment  $\mathbf{PGL}(2, \mathbf{C})$  agit sur  $\mathbf{P}(V_5) \simeq \mathbf{CP}(4)$ . On retrouve et on précise les résultats du paragraphe ci-dessus.

On compte cinq cas de figures différents : les quadruplets de points tous distincts, les paires de points doubles, les quadruplets formés d'un point triple et d'un point double, les quadruplets formés d'une paire de points doubles et d'une paire de points simples et enfin les points quadruples.

Les quatre premières configurations produisent quatre orbites. En effet, une homographie permet d'échanger deux triplets de points donnés mais envoie quatre points distincts  $z_i$ ,  $i = 1, \dots, 4$ , sur 0, 1,  $\infty$  et le birapport  $\lambda$  des  $z_i$ . Toutefois le calcul du birapport tient compte de l'ordre dans lequel on s'est donné les  $z_i$  ; permuter ces quatre points a pour effet de changer le birapport  $\lambda$  en  $\frac{1}{\lambda}$ ,  $1 - \lambda$ ,  $\frac{1}{1 - \lambda}$ ,  $\frac{\lambda}{1 - \lambda}$ ,  $\frac{\lambda}{\lambda - 1}$  ou  $\frac{\lambda}{\lambda - 1}$ . Ainsi deux quadruplets de points distincts non numérotés peuvent être envoyés l'un sur l'autre par un élément de  $\mathbf{PGL}(2; \mathbf{C})$

si et seulement si les ensembles

$$\Lambda = \left\{ \lambda, \frac{1}{\lambda}, 1 - \lambda, \frac{1}{1 - \lambda}, \frac{\lambda}{1 - \lambda}, \frac{\lambda}{\lambda - 1} \right\}$$

et

$$\Lambda' = \left\{ \lambda', \frac{1}{\lambda'}, 1 - \lambda', \frac{1}{1 - \lambda'}, \frac{\lambda'}{1 - \lambda'}, \frac{\lambda'}{\lambda' - 1} \right\}$$

coïncident. Or  $\Lambda$  et  $\Lambda'$  coïncident si et seulement si  $j(\lambda) = j(\lambda')$ . On retrouve ainsi la situation du 2.4.3.

Décrivons par exemple l'orbite d'un point quadruple : se donner un point quadruple revient à se donner un polynôme homogène de degré 4 de la forme

$$P(z_0, z_1) = (\beta z_0 - \alpha z_1)^4$$

ce qui détermine un point  $[\alpha : \beta] \in \mathbf{CP}(1)$ . On peut donc paramétrer les points quadruples par l'application

$$(\alpha, \beta) \mapsto (\beta z_0 - \alpha z_1)^4 = \beta^4 z_0^4 - 4\beta^3 \alpha z_0^3 z_1 + 6\beta^2 \alpha^2 z_0^2 z_1^2 - 4\beta \alpha^3 z_0 z_1^3 + \alpha^4 z_1^4$$

qui induit l'application de  $\mathbf{CP}(1)$  dans  $\mathbf{CP}(4)$  :

$$[\alpha : \beta] \mapsto [\beta^4 : -4\beta^3 \alpha : 6\beta^2 \alpha^2 : -4\beta \alpha^3 : \alpha^4 \beta^4]$$

Son image est une courbe de degré 4 appelée courbe de Véronèse.

L'action de  $\mathbf{PGL}(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{CP}(4)$  induit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage associé à  $\mathcal{L} \simeq \mathfrak{sl}(2, \mathbf{C})$ . On cherche une expression de l'intégrale première de ce  $\mathcal{L}$ -feuilletage ; on profite de l'existence d'invariants de l'action de  $\mathbf{GL}(2, \mathbf{C})$  sur  $V_5$ . Il existe deux tels invariants homogènes de degré respectivement 2 et 3 ([8]) :

$$P(\alpha_0 z_0^4 + \alpha_1 z_0^3 z_1 + \alpha_2 z_0^2 z_1^2 + \alpha_3 z_0 z_1^3 + \alpha_4 z_1^4) = \alpha_0 \alpha_4 - \frac{1}{4} \alpha_1 \alpha_3 + \frac{1}{12} \alpha_2^2$$

et

$$\begin{aligned} H(\alpha_0 z_0^4 + \alpha_1 z_0^3 z_1 + \alpha_2 z_0^2 z_1^2 + \alpha_3 z_0 z_1^3 + \alpha_4 z_1^4) &= \det \begin{pmatrix} \alpha_0 & \frac{\alpha_1}{4} & \frac{\alpha_2}{6} \\ \frac{\alpha_1}{4} & \frac{\alpha_2}{6} & \frac{\alpha_3}{4} \\ \frac{\alpha_2}{6} & \frac{\alpha_3}{4} & \alpha_4 \end{pmatrix} \\ &= \frac{\alpha_0 \alpha_2 \alpha_4}{6} - \frac{\alpha_0 \alpha_3^2}{16} - \frac{\alpha_1^2 \alpha_2}{16} + \frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3}{96} + \frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3}{96} - \frac{\alpha_2^3}{216} \end{aligned}$$

Ainsi on trouve que  $\frac{P^3}{\Delta}$  où  $\Delta = 2^8(P^3 - 27H^2)$  est une intégrale première du  $\mathcal{L}$ -feuilletage induit par l'action de  $\mathbf{PGL}(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{CP}(4)$ . On en déduit que  $\frac{P^3}{\Delta}$  est une fonction linéaire de l'invariant  $j$  :  $\frac{P^3}{\Delta} = \frac{1}{1728}j$ .

**4.5. Action de  $\mathbf{PGL}(3, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{CP}(7)$ .** On considère l'espace  $V$  des formes différentielles

$$\omega = \sum_{k=0}^2 A_k dz_k$$

où les  $A_k$  sont des polynômes homogènes de degré 2 tels que  $\sum_{k=0}^2 A_k z_k = 0$ .

Cet espace est de dimension 8; un élément générique de  $V$ , i.e. un élément tel que  $\gcd(A_0, A_1, A_2) = 1$ , représente un feuilletage de degré 1 sur  $\mathbf{CP}(2)$  (cf. chapitre 3)

Le groupe  $\mathrm{GL}(3, \mathbf{C})$  agit sur  $V$  de façon naturelle

$$g.\omega = g^*\omega$$

où  $\omega \in V$  et  $g \in \mathrm{GL}(3, \mathbf{C})$ . Soient  $\lambda, \mu \in \mathbf{C}^*$ , on a

$$(\lambda g).(\mu \omega) = \frac{\mu^2}{\lambda} g.\omega$$

et l'action de  $\mathrm{GL}(3, \mathbf{C})$  sur  $V$  induit donc une action de  $\mathbf{PGL}(3, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{P}(V) \simeq \mathbf{CP}(7)$ .

Donnons une brève description de cette action.

Commençons par nous intéresser aux éléments  $\omega_{n,g}$  non génériques de  $V$ , i.e. aux éléments tels que  $\gcd(A_0, A_1, A_2) \neq 1$ ; la 1-forme  $\omega_{n,g}$  s'écrit

$$L\left(\sum_{k=0}^2 L_k dz_k\right)$$

avec  $\sum_{k=0}^2 L_k z_k = 0$ . On remarque que  $\sum_{k=0}^2 L_k dz_k$  est linéairement conjugué à

$$z_1 dz_2 - z_2 dz_1$$

Par suite, les 1-formes  $\omega_{n,g}$  sont linéairement conjuguées à des formes du type

$$L(z_1 dz_2 - z_2 dz_1)$$

où  $L$  est linéaire. Si  $L$  dépend seulement de  $(z_1, z_2)$ , on se ramène au modèle

$$\omega_1 = z_1(z_1 dz_2 - z_2 dz_1)$$

et sinon à

$$\omega_0 = z_0(z_1 dz_2 - z_2 dz_1)$$

Se donner un élément de  $\mathcal{Orb}[\omega_1]$ , où  $\mathcal{Orb}[\omega_1]$  désigne l'orbite de  $[\omega_1]$ , revient à se donner une droite (la droite  $z_1 = 0$ ) du pinceau de droites associé au feuilletage de degré 0 décrit par  $z_1 dz_2 - z_2 dz_1$ ; ainsi  $\dim \mathcal{Orb}[\omega_1] = 3$ .

Un élément de  $\mathcal{O}rb[\omega_0]$  correspond au point de base du pinceau de droites associé au feuilletage de degré 0 décrit par  $z_1 dz_2 - z_2 dz_1$  et à une droite générique ; ainsi  $\dim \mathcal{O}rb[\omega_0] = 4$ .

On constate que  $\mathcal{O}rb[\omega_1] \subset \overline{\mathcal{O}rb[\omega_0]}$  et que  $\overline{\mathcal{O}rb[\omega_0]}$  est biholomorphe à  $\mathbf{CP}(2) \times \mathbf{CP}(2) \simeq \mathbf{CP}(2) \times \mathbf{CP}(2)$ , où  $\mathbf{CP}(2)$  désigne l'espace projectif dual. Dans  $\mathbf{CP}(2) \times \mathbf{CP}(2)$ , l'orbite de  $[\omega_1]$  s'identifie à la variété d'incidence

$$\{(x, \mathcal{D}) \in \mathbf{CP}(2) \times \mathbf{CP}(2), x \in \mathcal{D}\}$$

i.e. à

$$\{([z_0 : z_1 : z_2], [\alpha_0 : \alpha_1 : \alpha_2]) \in \mathbf{CP}(2) \times \mathbf{CP}(2), z_0 \alpha_0 + z_1 \alpha_1 + z_2 \alpha_2 = 0\}$$

Soit  $\omega$  un élément générique de  $V$  ; le feuilletage  $\mathcal{F}$  défini par  $\omega$  a alors 3

points singuliers. Il laisse donc trois droites distinctes invariantes (les droites joignant les trois points singuliers) que l'on peut supposer être, quitte à faire une transformation linéaire, les droites d'équation  $z_0 = 0$ ,  $z_1 = 0$ ,  $z_2 = 0$ . Dans la carte affine  $z_0 = 1$ , la 1-forme  $\omega$  s'écrit

$$B_1(1, z_1, z_2) dz_1 + B_2(1, z_1, z_2) dz_2 + B_3(1, z_1, z_2)(z_1 dz_2 - z_2 dz_1)$$

où  $B_1$  et  $B_2$  désignent des fonctions affines et  $B_3$  une fonction linéaire. La droite d'équation  $z_1 = 0$  étant invariante par le feuilletage, la fonction affine  $B_2$  est divisible par  $z_1$  donc s'écrit  $\text{cte.} z_1$  ; de même, on obtient que  $B_1$  s'écrit  $\text{cte.} z_2$ . Enfin l'invariance de la droite à l'infini par le feuilletage implique que  $B_3 = 0$ . Finalement  $\omega$  s'écrit

$$\omega_\lambda = z_2 dz_1 - \lambda z_1 dz_2$$

En considérant

$$\begin{aligned} \phi : \mathbf{C}^2 &\rightarrow \mathbf{C}^2 \\ (z_1, z_2) &\mapsto (z_2, z_1) \end{aligned}$$

on constate que  $\mathcal{O}rb[\omega_\lambda] = \mathcal{O}rb[\omega_{\frac{1}{\lambda}}]$  ; dit autrement les feuilletages  $\mathcal{F}_\lambda$  et  $\mathcal{F}_{\frac{1}{\lambda}}$  décrits respectivement par  $\omega_\lambda$  et  $\omega_{\frac{1}{\lambda}}$  sont conjugués. En permutant les droites invariantes entre elles, on obtient : les deux feuilletages  $\mathcal{F}_\lambda$  et  $\mathcal{F}_{\lambda'}$  sont conjugués si et seulement si  $\Lambda = \Lambda'$  autrement dit si et seulement si  $j(\lambda) = j(\lambda')$  avec les notations habituelles.

Comme les orbites génériques sont de dimension 6, l'action de  $\mathbf{PGL}(3, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{CP}(7)$  produit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 et de codimension 1 sur  $\mathbf{CP}(7)$  associé à  $sl(3, \mathbf{C})$ . Le calcul du degré a aussi été effectué par J. V. Pereira en utilisant encore la méthode de Darboux. On constate, mais ce n'est pas nouveau, l'ubiquité de la fonction  $j$ .

**4.6. Action de  $\mathrm{SL}(2n, \mathbf{C})$  sur les matrices antisymétriques en dimension paire  $\mathcal{A}sym(2n, \mathbf{C})$ .** Soit  $M \in \mathcal{A}sym(2n, \mathbf{C})$ , alors  $M$  s'écrit

$$\begin{pmatrix} 0 & & m_{i,j} \\ & \ddots & \\ -m_{i,j} & & 0 \end{pmatrix}$$

et  $\det M$  est un polynôme de degré  $2n$  en  $m_{i,j}$  qui s'avère être un carré. Il se trouve que  $\sqrt{\det}$  est l'unique invariant de l'action de  $\mathrm{SL}(2n, \mathbf{C})$  sur  $\mathcal{A}sym(2n, \mathbf{C})$  ce qui produit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré  $n - 1$  sur  $\mathbf{C}^{n(2n-1)}$  dont les feuilles sont les niveaux génériques de  $\sqrt{\det}$ . On peut prolonger ce feuilletage à  $\mathbf{CP}(n(2n - 1))$ . Pour  $n = 3$  on construit ainsi un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(15)$ .

**4.7. Action de  $\mathrm{GL}(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{V}_5$ .** L'action naturelle de  $\mathrm{GL}(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{V}_5$  possède l'invariant homogène de degré 2 suivant ([8])

$$\begin{aligned} H(\alpha_0 z_0^4 + \alpha_1 z_0^3 z_1 + \alpha_2 z_0^2 z_1^2 + \alpha_3 z_0 z_1^3 + \alpha_4 z_1^4) &= \det \begin{pmatrix} \alpha_0 & \frac{\alpha_1}{4} & \frac{\alpha_2}{6} \\ \frac{\alpha_1}{4} & \frac{\alpha_2}{6} & \frac{\alpha_3}{4} \\ \frac{\alpha_2}{6} & \frac{\alpha_3}{4} & \alpha_4 \end{pmatrix} \\ &= \frac{\alpha_0 \alpha_2 \alpha_4}{6} - \frac{\alpha_0 \alpha_3^2}{16} - \frac{\alpha_1^2 \alpha_4}{16} + \frac{\alpha_1 \alpha_2^2}{144} + \frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3}{216} - \frac{\alpha_2^3}{216} \end{aligned}$$

Cette action induit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 et de codimension 1 sur  $\mathbf{C}^5$  qui se prolonge à  $\mathbf{CP}(5)$ .

**4.8. Feuilletage exceptionnel.** Soit  $\Gamma$  la cubique gauche de  $\mathbf{C}^3$  paramétrée par

$$t \mapsto (t, \frac{t^2}{2}, \frac{t^3}{6})$$

On note  $\mathrm{Aut}_\Gamma \mathbf{C}^3$  les automorphismes affines de  $\mathbf{C}^3$  laissant  $\Gamma$  invariante. En fait  $\mathrm{Aut}_\Gamma \mathbf{C}^3$  est isomorphe au groupe affine de la droite.

L'orbite d'un point  $m$  sous l'action de  $\mathrm{Aut}_\Gamma \mathbf{C}^3$  est une variété d'adhérence algébrique. Cette action induit donc un  $\mathcal{L}$ -feuilletage, noté  $\mathcal{F}_\Gamma$ , sur  $\mathbf{C}^3$  dont le lieu singulier est  $\Gamma$ . Pour mieux comprendre  $\mathcal{F}_\Gamma$  on redresse  $\Gamma$  par l'automorphisme polynomial

$$\phi : (x, y, z) \mapsto (x, y - \frac{x^2}{2}, z - \frac{x^3}{3})$$

On constate que  $\phi^* \Gamma$  est une droite et  $\phi^* \mathcal{F}_\Gamma$  est un feuilletage dont les feuilles sont des cylindres au dessus de cusp. On peut prolonger ce feuilletage en un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 et de codimension 1 sur  $\mathbf{CP}(3)$  dont le lieu singulier est l'union de  $\Gamma$ , d'une droite et d'une conique. L'algèbre  $\mathcal{L}$  est isomorphe à l'algèbre de Lie du groupe des transformations affines. Le théorème



de Darboux-Jouanolou assure que le feuilletage  $\mathcal{F}_\Gamma$  a une intégrale première rationnelle qui se calcule en fait explicitement ([3]) :

$$\frac{\left(z_0 z_3^2 - z_1 z_2 z_3 + \frac{z_2^3}{3}\right)^2}{\left(z_1 z_3 - \frac{z_2^2}{2}\right)^3}$$

On note  $\omega_\Gamma$  une 1-forme définissant le feuilletage  $\mathcal{F}_\Gamma$ . On dit que le feuilletage  $\mathcal{F}'$  de degré 2 défini par  $[\omega']$  (classe de  $\omega$  dans l'espace projectif des formes de degré 3) est voisin de  $\mathcal{F}_\Gamma$  si  $[\omega']$  est proche de  $[\omega_\Gamma]$ . Si  $\mathcal{F}'$  est un feuilletage de degré 2 voisin de  $\mathcal{F}_\Gamma$  alors  $\mathcal{F}'$  s'écrit  $\sigma^* \mathcal{F}_\Gamma$  où  $\sigma$  est un automorphisme de  $\mathbf{CP}(3)$  ([3]). On dit que le feuilletage  $\mathcal{F}_\Gamma$  est stable et on l'appelle feuilletage exceptionnel. De la stabilité résulte que la variété algébrique

$$\overline{\{\sigma^* \mathcal{F}_\Gamma, \sigma \in \text{Aut } \mathbf{CP}(3)\}}$$

est une composante irréductible de l'espace des feuilletages de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$  ([3]).

Le feuilletage exceptionnel apparaît aussi lorsqu'on considère l'action naturelle du groupe triangulaire

$$\mathcal{T}_2 = \left\{ \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ 0 & \frac{1}{\alpha} \end{pmatrix} \mid \alpha \in \mathbf{C}^*, \beta \in \mathbf{C} \right\} \subset SL(2; \mathbf{C})$$

sur  $V_4$ . Elle induit une action de  $\mathbf{P}\mathcal{T}_2$  sur  $\mathbf{CP}(3)$  dont les orbites sont de dimension 2, autrement dit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 et de codimension 1 sur  $\mathbf{CP}(3)$  associé à l'algèbre du groupe des transformations affines. On peut montrer que c'est le feuilletage exceptionnel.

Il y a encore une autre façon de voir le feuilletage exceptionnel. On considère l'action de  $\mathbf{PGL}(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{CP}(4) = \{\text{quadruplets de points sur } \mathbf{CP}(1)\}$ . On a vu que l'invariant de cette action est l'invariant  $j$  des courbes elliptiques ; fixer la position d'un des quatre points revient à se donner un hyperplan  $\mathbf{CP}(3) \subset \mathbf{CP}(4)$ . La restriction de l'invariant  $j$  à ce  $\mathbf{CP}(3)$  donne encore le feuilletage exceptionnel.

## 5. Exemple de Gordan-Nøether.

Hesse affirme que si  $P$  est un polynôme homogène en les variables  $z_1, \dots, z_n$ , alors les assertions suivantes sont équivalentes

- (i)  $\det \mathcal{H}_{\text{ess}} P = 0$
- (ii) le polynôme  $P$  « dépend de moins de  $n$  variables ».

Bien sûr  $\mathcal{H}\text{ess } P$  désigne la matrice hessienne de  $P$ .

Sylvester commence par corriger l'affirmation de Hesse ; si  $P$  est un polynôme homogène en  $z_1, \dots, z_n$ , les affirmations suivantes sont équivalentes :

- (a) Il existe  $\kappa_1, \dots, \kappa_n \in \mathbf{C}$  non tous nuls tels que  $\sum_{j=1}^n \kappa_j \frac{\partial P}{\partial z_j} = 0$
- (b) le polynôme  $P \ll$  dépend de moins de  $n$  variables  $\gg$ .

Puis Gordan et Noëther donnent un contre-exemple à l'affirmation de Hesse : le polynôme homogène de degré 3 sur  $\mathbf{C}^5$

$$P(z_1, z_2, z_3, z_4, z_5) = z_1^2 z_3 + z_1 z_2 z_4 + z_2^2 z_5$$

vérifie (i) mais pas (ii). Il se trouve que  $P$  définit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage  $\mathcal{F}_{GN}$  sur  $\mathbf{C}^5$ . Les champs

$$\begin{aligned} X_1 &= z_2 \frac{\partial}{\partial z_3} - z_1 \frac{\partial}{\partial z_4}, & X_2 &= z_2 \frac{\partial}{\partial z_4} - z_1 \frac{\partial}{\partial z_5}, \\ X_3 &= z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} - 2z_3 \frac{\partial}{\partial z_3} - z_4 \frac{\partial}{\partial z_4}, & X_4 &= z_2 \frac{\partial}{\partial z_2} - z_4 \frac{\partial}{\partial z_4} - 2z_5 \frac{\partial}{\partial z_5} \end{aligned}$$

annulent  $P$ , sont linéairement indépendants et vérifient les relations

$$\begin{aligned} [X_1, X_2] &= 0, & [X_1, X_3] &= -2X_1, & [X_1, X_4] &= -X_1, \\ [X_2, X_3] &= -X_2, & [X_2, X_4] &= -2X_2 & \text{et} & [X_3, X_4] = 0 \end{aligned}$$

Ils engendrent une algèbre de Lie maximale  $\mathcal{L}$  qui est ponctuellement de dimension 4. Le  $\mathcal{L}$ -feuilletage  $\mathcal{F}_{GN}$  se prolonge en un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(5)$  dont une intégrale première est

$$\frac{z_1^2 z_3 + z_1 z_2 z_4 + z_2^2 z_5}{z_0^3}$$

Dans ce feuilletage il y a un sous-feuilletage en 2-plans qui admet pour intégrale première

$$z_1 = \text{cte}, \quad z_2 = \text{cte}, \quad z_1^2 z_3 + z_1 z_2 z_4 + z_2^2 z_5 = \text{cte}$$

Ce feuilletage en 2-plans produit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de codimension 3 sur  $\mathbf{C}^5$  et  $\mathbf{CP}(5)$ . L'algèbre  $\mathcal{L}$  est engendré par les champs  $X_1$  et  $X_2$ .

Il produit aussi un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de codimension 2 sur  $\mathbf{CP}(4)$  d'algèbre  $\tilde{\mathcal{L}} = \langle X_1, X_2, R \rangle$  avec pour intégrales premières

$$\frac{z_1}{z_2} \text{ et } \frac{P}{z_1^3}$$

et donc défini en coordonnées homogènes par la 2-forme de degré 3

$$z_1 dz_2 \wedge dP - z_2 dz_1 \wedge dP + 3P dz_1 \wedge dz_2$$

Il s'obtient comme « intersection » de deux feuilletages ; cependant la 2-forme  $\Omega$  n'est pas du type  $\Omega = \alpha \wedge \beta$  avec  $\alpha$  et  $\beta$  deux 1-formes homogènes.

Revenons au polynôme de Gordan-Nøether ; le lieu singulier de  $P$  est l'intersection des deux hyperplans  $\{z_1 = 0\}$  et  $\{z_2 = 0\}$ , i.e. un espace linéaire de codimension 2 dans  $\mathbf{C}^5$ .

Soit  $f$  un polynôme homogène de degré 3 sur  $\mathbf{C}^n$  dont le lieu singulier est l'espace linéaire de codimension 2 défini par  $\{z_1 = z_2 = 0\}$ . Alors  $f = z_1 A + z_2 B$  ; comme le lieu des zéros de

$$\frac{\partial f}{\partial z_1} = A + z_1 \frac{\partial A}{\partial z_1} + z_2 \frac{\partial B}{\partial z_1} \quad \text{et} \quad \frac{\partial f}{\partial z_2} = z_1 \frac{\partial A}{\partial z_2} + B + z_2 \frac{\partial B}{\partial z_2}$$

est  $\{z_1 = z_2 = 0\}$ ,  $f$  s'écrit

$$\alpha z_1^2 + \beta z_1 z_2 + \gamma z_2^2$$

où  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont des formes linéaires. On constate alors que l'exemple de Gordan-Nøether n'est jamais que l'exemple générique :  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont indépendantes ; ceci n'arrive qu'à partir de la dimension 5. D'où la

**PROPOSITION 2.4.** *Soit  $f$  un polynôme homogène de degré 3 sur  $\mathbf{C}^n$ ,  $n \geq 5$ . Supposons que  $\text{Sing } f$  soit un espace linéaire de codimension 2. Alors génériquement  $f$  est linéairement conjugué à l'exemple de Gordan et Nøether  $z_1^2 z_2 + z_1 z_2 z_4 + z_2^2 z_5$ .*

*En particulier le feuilletage associé à  $f$  est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage.*



## CHAPITRE 3

### $\mathcal{L}$ -feuilletages de degrés 0 et 1 sur $\mathbf{CP}(n)$ .

#### 1. Feuilletages de degré 0 sur $\mathbf{CP}(n)$ .

La proposition suivante donne une description des feuilletages de degré 0 sur  $\mathbf{CP}(n)$  :

**PROPOSITION 3.1.** *Un feuilletage  $\mathcal{F}$  de degré 0 sur  $\mathbf{CP}(n)$  est associé à un pinceau d'hyperplans, i.e. possède une intégrale première  $\frac{\ell_1}{\ell_2}$  où  $\ell_1$  et  $\ell_2$  sont des formes linéaires indépendantes. En particulier,  $\mathcal{F}$  est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage.*

**DÉMONSTRATION.** Soient  $\omega$  une 1-forme définissant le feuilletage  $\mathcal{F}$  et  $m \notin \text{Sing } \omega$ . Le théorème de Frobenius assure l'existence au voisinage du point  $m$  d'une submersion  $z_1$  et d'une unité  $u$  que l'on peut écrire  $\text{cte} - z_2$  telles que

$$\omega = (\text{cte} - z_2)dz_1$$

d'où l'égalité

$$d\omega = dz_1 \wedge dz_2$$

Mais comme  $d\omega$  est une 2-forme « constante », un développement de Taylor au voisinage de  $m$  générique assure l'existence de deux formes linéaires  $\ell_1$  et  $\ell_2$  telles que  $d\omega = d\ell_1 \wedge d\ell_2$ .

Il en résulte que  $\omega = \frac{1}{2}(\ell_1 d\ell_2 - \ell_2 d\ell_1) + dQ$  où  $Q$  est une forme quadratique. Comme  $\omega$  annule le champ radial, la forme quadratique  $Q$  est nulle.

Autrement dit à conjugaison près par un automorphisme de  $\mathbf{CP}(n)$ , il y a un unique feuilletage  $\mathcal{F}_0$  de degré 0 dans  $\mathbf{CP}(n)$ , le feuilletage associé à

$$\omega_0 = z_0 dz_1 - z_1 dz_0$$

i.e. au pinceau d'hyperplans  $\frac{z_1}{z_0} = \text{cte}$ .

Soit  $\tilde{\mathcal{L}}$  l'algèbre de Lie des champs linéaires sur  $\mathbf{C}^{n+1}$  annulés par la 1-forme

$$z_0 dz_1 - z_1 dz_0$$

On constate que

$$R, z_j \frac{\partial}{\partial z_i} \quad i \geq 2, \quad j \geq 0$$

forment une base de  $\tilde{\mathcal{L}}$  qui est visiblement maximale. On peut évidemment préciser la nature algébrique de  $\tilde{\mathcal{L}}$  et donc de  $\mathcal{L}$  : l'algèbre  $\mathcal{L}$  s'identifie à celle des matrices  $(n+1) \times (n+1)$  dont les deux premières lignes sont nulles.  $\square$

## 2. Feuilletages de degré 1 sur $\mathbf{CP}(n)$ .

On commence par rappeler qu'un feuilletage de degré 1 sur  $\mathbf{CP}(2)$  possède une intégrale première de l'un des 3 types suivants :

$$z_0^{\lambda_0} z_1^{\lambda_1} z_2^{\lambda_2} \text{ où } \lambda_i \in \mathbf{C} \text{ et } \sum_{i=0}^2 \lambda_i = 0$$

$$\frac{z_0}{z_1} \exp\left(\frac{z_2}{z_1}\right)$$

$$\frac{Q}{z_0^2}$$

où  $Q$  est une forme quadratique de rang maximum.

En effet, soit  $\mathcal{F}$  un feuilletage de degré 1 sur  $\mathbf{CP}(2)$  décrit par la 1-forme  $\omega$ . Le feuilletage  $\mathcal{F}$  admet trois points singuliers donc une droite invariante. En effet supposons que ces trois points ne soient pas confondus, alors la droite passant par deux points singuliers distincts est invariante car a deux points de contacts avec le feuilletage qui est de degré 1. Si les trois points singuliers sont confondus, alors chaque droite passant par le point singulier triple a un contact d'ordre 3 donc est invariante. Le feuilletage est donc un pinceau d'hyperplans, i.e. de degré 0 ce qui est exclu.

Si les trois points singuliers du feuilletage  $\mathcal{F}$  sont distincts et non alignés, notons  $\mathcal{D}$  une droite passant par deux de ces points ; dans la carte affine  $\mathbf{CP}(2) \setminus \mathcal{D}$ , le feuilletage  $\mathcal{F}$  est décrit par la 1-forme

$$\omega|_{\mathbf{CP}(2) \setminus \mathcal{D}} = f(z_1, z_2)dz_1 + g(z_1, z_2)dz_2$$

avec  $f$  et  $g$  affines. Si on prend comme origine le troisième point singulier de  $\mathcal{F}$ , le feuilletage  $\mathcal{F}$  est alors décrit dans la carte affine par la 1-forme

$$\tilde{\omega} = (\alpha z_1 + \beta z_2)dz_1 + (\gamma z_1 + \delta z_2)dz_2$$

avec  $\alpha, \beta, \gamma, \delta \in \mathbf{C}$ . On constate alors que le feuilletage est invariant sous l'action du flot du champ radial

$$(z_1, z_2) \mapsto (e^t z_1, e^t z_2)$$

autrement dit  $R$  est une symétrie et  $P = i_R \tilde{\omega}$  est un facteur intégrant. On a alors à conjugaison près l'alternative  $P = z_0 z_1$  ou  $P = z_0^2$  ; si  $P = z_0 z_1$  alors le feuilletage  $\mathcal{F}$  admet une intégrale première de type  $z_0^{\lambda_0} z_1^{\lambda_1} z_2^{\lambda_2}$  ; dans le second

cas le feuilletage admet une intégrale première de type  $\frac{z_1}{z_0} \exp(\frac{z_2}{z_1})$ . En fait, dans cette situation, on vérifie que  $\mathcal{F}$  n'a que deux points singuliers.

Si les trois points singuliers du feuilletage sont distincts et alignés, on se donne, pour tout  $t \in \mathbf{C}$ , une 1-forme  $\omega_t$  définissant un feuilletage  $\mathcal{F}_t$  dont les trois points singuliers ne sont pas alignés telle que  $\lim_{t \rightarrow 0} \omega_t = \omega$ . Par ce qui précède le feuilletage  $\mathcal{F}_t$  possède un facteur intégrant  $P_t$ ; par compacité,  $\lim_{t \rightarrow 0} [P_t]$  a un sens et produit un facteur intégrant  $P$  de  $\omega$ . L'identité d'Euler assure que le polynôme  $P$  est réductible, donc appartient à la liste suivante (à conjugaison près) :

$$z_0^3, z_0 z_1 z_2, z_0 z_1^2, z_0 Q$$

où  $Q$  est une forme quadratique de rang maximum. Si  $P = z_0 Q$  où  $Q$  est une forme quadratique de rang maximum, alors :

$$\frac{\omega}{P} = \lambda_0 \frac{dz_0}{z_0} + \lambda_1 \frac{dQ}{Q}$$

avec  $\lambda_0 + 2\lambda_1 = 0$ . Quitte à prendre  $\lambda_0 = 2$  et  $\lambda_1 = -1$ , on obtient

$$\frac{\omega}{P} = d \left( \frac{Q}{z_0^2} \right)$$

Considérons maintenant le cas où  $P = z_0^3$ ; alors

$$\frac{\omega}{P} = d \left( \frac{Q}{z_0^2} \right)$$

Si  $P = z_0 z_1 z_2$ , alors  $\mathcal{F}$  est un feuilletage logarithmique rencontré précédemment ; enfin si  $P = z_0 z_1^2$ , alors  $\mathcal{F}$  admet pour intégrale première

$$\frac{z_0}{z_1} \exp \left( \frac{z_2}{z_1} \right)$$

Rappelons le résultat suivant classifiant les feuilletages de degré 1 sur  $\mathbf{CP}(n)$ ,  $n \geq 3$ . Il est probablement dû à G. Reeb en tout cas dans le contexte affine ; on le trouve dans [9].

**THÉORÈME 3.2.** *Soit  $\mathcal{F}$  un feuilletage de degré 1 sur  $\mathbf{CP}(n)$  ; on a l'alternative suivante :*

(i) *Il existe un feuilletage  $\mathcal{F}_1$  de degré 1 sur  $\mathbf{CP}(2)$  et une projection  $\tau : \mathbf{CP}(n) \dashrightarrow \mathbf{CP}(2)$  telle que  $\mathcal{F} = \tau^* \mathcal{F}_1$ .*

(ii) *Le feuilletage  $\mathcal{F}$  possède une intégrale première rationnelle du type  $\frac{Q}{L^2}$  avec  $\deg(Q) = 2$  et  $\deg(L) = 1$ , i.e. le feuilletage  $\mathcal{F}$  est donné en coordonnées homogènes par*

$$\omega = LdQ - 2QdL$$

avec  $\text{codim } \text{Sing } \omega \geq 2$ .

Cet énoncé permet de montrer que l'espace des feuilletages de degré 1 sur  $\mathbf{CP}(n)$  a deux composantes irréductibles correspondant aux deux possibilités de l'alternative.

**COROLLAIRE 3.3.** *Tout feuilletage  $\mathcal{F}$  de degré 1 possède un hyperplan  $\mathcal{H}$  invariant par  $\mathcal{F}$ , autrement dit un hyperplan  $\mathcal{H}$  tel que  $\mathcal{H} \setminus \text{Sing } \mathcal{F}$  soit une feuille de  $\mathcal{F}$ .*

On en déduit la

**PROPOSITION 3.4.** *Soit  $\mathcal{F}$  un feuilletage de degré 1 sur  $\mathbf{CP}(n)$  possédant une intégrale première de type  $\frac{Q}{L^2}$ . Alors  $\mathcal{F}$  est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage. Si  $Q$  est générique, l'algèbre  $\mathcal{L}$  associée est isomorphe à  $so(n, \mathbf{C})$ .*

**DÉMONSTRATION.** On prend l'hyperplan invariant  $\mathcal{H} = (L = 0)$  comme hyperplan à l'infini. Sur  $\mathbf{CP}(n) \setminus \mathcal{H} \simeq \mathbf{C}^n$ , le feuilletage  $\mathcal{F}$  a pour intégrale première le polynôme

$$Q = q_0 + q_1(z) + q_2(z)$$

où les  $q_i$  sont homogènes de degré  $i$ . Si  $q_2$  est de rang maximum, alors quitte à composer par une translation à la source et une au but, on peut supposer que  $q_0 = q_1 = 0$ . Ainsi  $Q = q_2$  et l'algèbre des champs affines qui annulent  $Q$  est en fait une algèbre de champs linéaires car 0 est singularité isolée de  $Q$ ; cette algèbre est  $so(Q) \simeq so(n, \mathbf{C})$ .

Dans les cas où  $q_2$  n'est pas de rang maximum, alors  $Q$  est conjugué à  $z_0^2 + \dots + z_k^2 + q_1(z)$ , avec  $q_1$  affine. Si  $q_1$  est fonction de  $z_0, \dots, z_k$ , alors le polynôme  $Q$  est conjugué à  $z_0^2 + \dots + z_k^2$ ; le feuilletage  $\mathcal{F}$  décrit par  $Q$  est associé à l'algèbre engendrée par les champs

$$z_i \frac{\partial}{\partial z_j} - z_j \frac{\partial}{\partial z_i}, \quad 0 \leq i < j \leq k,$$

$$z_\ell \frac{\partial}{\partial z_p}, \quad \ell \geq 0, p \geq k+1, \text{ et } \frac{\partial}{\partial z_m}, \quad m \geq k+1.$$

Si  $q_1$  n'est pas une fonction de  $z_0, \dots, z_k$ , alors le polynôme  $Q$  s'écrit à conjugaison près  $z_0^2 + \dots + z_k^2 + z_{k+1}$ ; le feuilletage est alors associé à l'algèbre engendrée par les champs

$$z_i \frac{\partial}{\partial z_j} - z_j \frac{\partial}{\partial z_i}, \quad 1 \leq i < j \leq k, \quad z_\ell \frac{\partial}{\partial z_p}, \quad \ell \geq 1, p \geq k+2,$$

$$\frac{\partial}{\partial z_m}, \quad m \geq k+2, \text{ et } 2z_r \frac{\partial}{\partial z_{k+1}} - \frac{\partial}{\partial z_r}, \quad r \neq k+1$$



□

Lorsque  $\mathcal{F}$  est de type « pull-back » on a la :

**PROPOSITION 3.5.** *Soit  $\mathcal{F}$  un feuilletage de degré 1 sur  $\mathbf{CP}(n)$  du type  $\mathcal{F} = \tau^* \mathcal{F}_1$ , où  $\tau : \mathbf{CP}(n) \dashrightarrow \mathbf{CP}(2)$  est linéaire et  $\mathcal{F}_1$  un feuilletage de degré 1 sur  $\mathbf{CP}(2)$ . Alors  $\mathcal{F}$  est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage.*

**DÉMONSTRATION.** Soit  $\mathcal{D}$  une droite invariante par  $\mathcal{F}_1$  et  $\mathcal{H} = \tau^*(\mathcal{D})$ ; l'hyperplan  $\mathcal{H}$  est invariant par  $\mathcal{F}$ . Dans les cartes affines  $\mathbf{CP}(n) \setminus \mathcal{H} = \{z_1, \dots, z_n\}$  et  $\mathbf{CP}(2) \setminus \mathcal{D} = \{z_1, z_2\}$ , l'application  $\tau$  est de la forme

$$(z_1, \dots, z_n) \mapsto (z_1, z_2)$$

Le feuilletage  $\mathcal{F}_1$  est décrit dans la carte affine  $\{z_1, z_2\}$  par

$$\omega_1 = a(z_1, z_2)dz_1 + b(z_1, z_2)dz_2$$

avec  $a$  et  $b$  affines. Alors  $\mathcal{F} = \tau^*(\mathcal{F}_1)$  est donné par :

$$\omega = \tau^* \omega_1 = a(z_1, z_2)dz_1 + b(z_1, z_2)dz_2$$

Dans cette même carte, on constate que la 1-forme  $\omega$  annule les champs affines

$$b(z_1, z_2) \frac{\partial}{\partial z_1} - a(z_1, z_2) \frac{\partial}{\partial z_2}, \quad \frac{\partial}{\partial z_3}, \dots, \frac{\partial}{\partial z_n},$$

$$z_j \frac{\partial}{\partial z_k} \text{ pour } 3 \leq k \leq n, \quad 1 \leq j \leq n.$$

□

On en déduit le

**THÉORÈME 3.6.** *Tout feuilletage de degré 1 sur  $\mathbf{CP}(n)$  est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage.*

La proposition 3.5 ne se généralise pas en degré supérieur :

**PROPOSITION 3.7.** *Soit  $\mathcal{F}$  du type  $\mathcal{F} = \tau^* \mathcal{F}_1$ , où  $\tau : \mathbf{CP}(n) \dashrightarrow \mathbf{CP}(2)$  est linéaire et  $\mathcal{F}_1$  est un feuilletage de degré plus grand que 2 sur  $\mathbf{CP}(2)$ . Alors  $\mathcal{F}$  n'est pas un  $\mathcal{L}$ -feuilletage.*

**DÉMONSTRATION.** Comme dans la preuve de la proposition 3.5, on constate que  $\mathcal{F}$  est décrit par

$$\omega = A_0(z_0, z_1, z_2)dz_0 + A_1(z_0, z_1, z_2)dz_1 + A_2(z_0, z_1, z_2)dz_2$$

où les  $A_i$  sont de degré  $\geq 3$ . On remarque que  $\omega$  annule le champ radial et les champs  $z_j \frac{\partial}{\partial z_k}$  pour  $k \geq 3$  et  $j = 0, \dots, n$ . Supposons que pour  $z$  générique

$$\dim_{\mathbf{C}} \mathcal{L}(z) = \dim_{\mathbf{C}} \{X(z), X \in \mathcal{L}\} = n - 1$$

Alors il existe  $X$  champ linéaire qui annule  $\omega$  et tel que la 1-forme  $\bar{\omega}$  de degré 2 définie par

$$i_R i_X dz_0 \wedge dz_1 \wedge dz_2$$

soit non identiquement nulle. En un point  $m$  générique, on a  $\ker \omega(m) = \ker \bar{\omega}(m)$ , autrement dit  $\omega$  et  $\bar{\omega}$  sont colinéaires. La 1-forme  $\bar{\omega}$  s'écrit  $Q\bar{\omega}'$  où  $\text{Sing } \bar{\omega}'$  est de codimension 2 et  $\deg \bar{\omega}' \leq 2$ . La colinéarité de  $\omega$  et  $\bar{\omega}$  entraîne celle de  $\omega$  et  $\bar{\omega}'$ ; ainsi  $\omega$  s'écrit  $P\bar{\omega}'$  avec  $\deg P \geq 1$  et  $\omega$  s'annule sur l'hypersurface définie par le lieu des zéros de  $P$  ce qui viole la condition  $\text{codim}_{\mathbf{C}} \text{Sing } \omega \geq 2$ .  $\square$

## CHAPITRE 4

### $\mathcal{L}$ -feuilletages sur $\mathbf{CP}(3)$ .

#### 1. Feuilletages de degré 2 sur $\mathbf{CP}(3)$ .

On rappelle d'abord la description de l'espace des feuilletages de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$  ([3]). Puis on dégage quelques obstructions à ce qu'un tel feuilletage soit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage. On introduit les sous-ensembles  $\Sigma(\cdot; 3)$  des formes homogènes intégrables de degré 3 sur  $\mathbf{C}^4$  :

(i) On note

$$\Sigma(1, 1, 1, 1; 3) = \left\{ \ell_0 \ell_1 \ell_2 \ell_3 \sum_{k=0}^3 \lambda_k \frac{d\ell_k}{\ell_k} \mid \lambda_k \in \mathbf{C}^*, \sum_{k=0}^3 \lambda_k = 0 \right\}$$

où les  $\ell_i$  sont des formes linéaires non nulles. On définit alors la sous-variété irréductible  $\overline{\mathbf{P}\Sigma}(1, 1, 1, 1; 3)$  de  $\mathbf{P}\Omega_3^1(\mathbf{C}^4)$ , où  $\Omega_p^1(\mathbf{C}^n)$  désigne l'espace des 1-formes homogènes de degré  $p$  sur  $\mathbf{C}^n$ . Un élément  $[\omega] \in \overline{\mathbf{P}\Sigma}(1, 1, 1, 1; 3)$  définit un feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$  si  $\text{codim}_{\mathbf{C}} \mathcal{S}\text{ing } \omega \geq 2$ . Ces éléments constituent un ouvert de Zariski  $\overline{\mathbf{P}\Sigma}(1, 1, 1, 1; 3)^*$  de la sous-variété unirationnelle  $\overline{\mathbf{P}\Sigma}(1, 1, 1, 1; 3)$ .

Plus généralement si  $\Theta$  est un sous-ensemble de  $\mathbf{P}\Omega_3^1(\mathbf{C}^4)$ , on note

$$\Theta^* := \{[\omega] \in \Theta \mid \text{codim}_{\mathbf{C}} \mathcal{S}\text{ing } \omega \geq 2\}$$

(ii) On introduit l'ouvert de Zariski  $\overline{\mathbf{P}\Sigma}(1, 1, 2; 3)^*$  de la variété unirationnelle  $\overline{\mathbf{P}\Sigma}(1, 1, 2; 3)$  où

$$\Sigma(1, 1, 2; 3) = \left\{ \ell_0 \ell_1 Q \left( \lambda_0 \frac{d\ell_0}{\ell_0} + \lambda_1 \frac{d\ell_1}{\ell_1} + \lambda_2 \frac{dQ}{Q} \right) \mid \lambda_i \in \mathbf{C}^*, \lambda_0 + \lambda_1 + 2\lambda_2 = 0 \right\}$$

où les  $\ell_i$  sont des formes linéaires non nulles et  $Q$  une forme quadratique non triviale.

(iii) On définit l'ouvert de Zariski  $\overline{\mathbf{P}\Sigma}(1, 3; 3)^*$  de la variété unirationnelle  $\overline{\mathbf{P}\Sigma}(1, 3; 3)$  adhérence de :

$$\Sigma(1, 3; 3) = \left\{ \ell C \left( \lambda_0 \frac{d\ell}{\ell} + \lambda_1 \frac{dC}{C} \right) \mid \lambda_i \in \mathbf{C}^*, \lambda_0 + 3\lambda_1 = 0 \right\}$$

avec  $\ell$  forme linéaire non nulle et  $C$  de degré 3.

(iv) On définit aussi l'ouvert de Zariski  $\overline{\mathbf{P}\Sigma(2, 2; 3)}^*$  de la variété unirationnelle  $\overline{\mathbf{P}\Sigma(2, 2; 3)}$  adhérence de :

$$\Sigma(2, 2; 3) = \{Q_0 Q_1 \left( \lambda_0 \frac{dQ_0}{Q_0} + \lambda_1 \frac{dQ_1}{Q_1} \right), \mid \lambda_i \in \mathbf{C}^*, \lambda_0 + \lambda_1 = 0\}$$

où les  $Q_i$  sont des formes quadratiques.

On définit ensuite  $\mathbf{PB}(2; 3)$  l'ensemble des pull back linéaires comme suit :

$$\mathbf{PB}(2; 3) = \{\tau^* \tilde{\omega} \mid \tau : \mathbf{C}^4 \rightarrow \mathbf{C}^3 \text{ linéaire, } \tilde{\omega} \in \Omega_3^1(\mathbf{C}^3), i_R \tilde{\omega} = 0\}$$

et l'ouvert de Zariski  $\overline{\mathbf{PPB}(2; 3)}^*$  de la sous-variété unirationnelle  $\overline{\mathbf{PPB}(2; 3)}$ .

On termine par l'adhérence de l'orbite du feuilletage exceptionnel :

$$\text{Excep}(2, 3) = \overline{\mathbf{PGL}(4, \mathbf{C}).\omega_\Gamma} \cap \{[\omega], \text{codim}_{\mathbf{C}} \mathcal{S}ing \omega \geq 2\}$$

où  $\omega_\Gamma$  désigne la 1-forme définissant le feuilletage exceptionnel. Par construction, les éléments génériques de  $\text{Excep}(2, 3)$  sont conjugués et correspondent à un  $\mathcal{L}$ -feuilletage où  $\mathcal{L}$  est isomorphe à l'algèbre du groupe des transformations affines comme nous l'avons vu dans 2.4.8.

On peut maintenant énoncer le :

**THÉORÈME 4.1.** ([3]) *Les ensembles  $\overline{\mathbf{P}\Sigma(., 3)}^*$ ,  $\overline{\mathbf{PPB}(2; 3)}^*$  et  $\text{Excep}(2; 3)$  sont les composantes irréductibles de l'espace des feuilletages de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$ .*

Ce théorème se généralise en toute dimension ([3]).

Pour se convaincre que tous les feuilletages de degré 2 ne sont pas des  $\mathcal{L}$ -feuilletages nous allons voir des obstructions plus ou moins évidentes à ce qu'ils le soient; ces obstructions sont utilisées pour vérifier certains calculs. L'énoncé en dimension  $n \geq 4$  pourrait s'avérer pertinent pour la classification des feuilletages quadratiques de  $\mathbf{CP}(n)$ .

**LEMME 4.2.** *Un élément générique de  $\overline{\mathbf{P}\Sigma(1, 3; 3)}^*$  ne définit pas un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$ .*

**DÉMONSTRATION.** Soit  $\mathcal{F}$  le feuilletage décrit par

$$\omega = \ell C \left( \lambda_0 \frac{d\ell}{\ell} + \lambda_1 \frac{dC}{C} \right)$$

avec  $\lambda_0 + 3\lambda_1 = 0$ . Le feuilletage  $\mathcal{F}$  a pour intégrale première  $\frac{C}{\ell^3}$ ; ainsi dans la carte affine  $\mathbf{C}^3 = \mathbf{CP}(3) \setminus (\ell = 0)$ , les feuilles de  $\mathcal{F}$  sont les niveaux du polynôme  $C$  de degré 3 privés des points singuliers. On suppose que  $C$  est général autrement dit que les niveaux de  $C$  sont des surfaces cubiques générales; une telle surface contient 27 droites. Soit  $X \in \chi(\mathbf{CP}(3))$  un champ tangent à  $\mathcal{F}$ , alors  $X$  laisse l'hyperplan  $\ell = 0$  invariant et par suite est affine dans la carte  $\mathbf{C}^3$ . Un tel  $X$  est nécessairement tangent aux 27 droites de chaque niveau générique. Si  $\mathcal{F}$  était un  $\mathcal{L}$ -feuilletage, il existerait deux champs affines  $X$  et  $Y$  tels que

$$\omega|_{\mathbf{C}^3} = \text{cte } i_X i_Y dz_0 \wedge dz_1 \wedge dz_2$$

en particulier les champs  $X$  et  $Y$  seraient colinéaires le long d'un nombre fini de courbes. Or on vient de voir que dans chaque fibre générique de  $C$ , les champs  $X$  et  $Y$  sont colinéaires le long de 27 droites.  $\square$

De même on a le :

LEMME 4.3. *Un élément générique de  $\overline{\mathbf{P}\Sigma(2,2;3)}^*$  ne définit pas un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$ .*

DÉMONSTRATION. Soit  $\mathcal{F}$  un feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$  décrit par

$$\omega = Q_0 Q_1 \left( \frac{dQ_0}{Q_0} - \frac{dQ_1}{Q_1} \right).$$

Si  $Q_0$  et  $Q_1$  sont des formes quadratiques génériques, alors  $\mathbf{P}(Q_0 = Q_1 = 0)$  est une courbe elliptique  $\mathcal{E}$  non plane (quartique). Soit  $X \in \chi(\mathbf{CP}(3))$  un champ tangent au feuilletage  $\mathcal{F}$ ; comme  $\mathcal{E} \subset \text{Sing } \mathcal{F}$ , le champ  $X$  est tangent à  $\mathcal{E}$ . Si  $X$  est non identiquement nul sur  $\mathcal{E}$ , il induit un champ de vecteurs  $X_{\mathcal{E}}$  sur  $\mathcal{E}$ . Donc  $X_{\mathcal{E}}$  est constant et en particulier n'admet pas de singularité. Par suite  $\mathcal{E}$  est une trajectoire de  $X$ . La classification des champs linéaires dit que leurs seules trajectoires compactes sont les points singuliers; ainsi  $X_{\mathcal{E}} = 0$ . Le lieu des zéros d'un champ linéaire étant une sous-variété linéaire, on obtient finalement que  $X = 0$ .  $\square$

Le lemme suivant a été prouvé au chapitre 3 :

LEMME 4.4. *Un élément générique de  $\overline{\mathbf{P}PB(2;3)}$  n'est pas un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$ .*

**2.  $\mathcal{L}$ -feuillements de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$ .**

On s'intéresse à la classification des  $\mathcal{L}$ -feuillements sur  $\mathbf{CP}(3)$ . Dans le chapitre précédent, on a vu que les feuillements de degrés 0 et 1 sont des  $\mathcal{L}$ -feuillements.

La liste des  $\mathcal{L}$ -feuillements de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$  est donnée par le théorème suivant ; dans l'énoncé  $(z_0, z_1, z_2, z_3)$  désigne un système de coordonnées.

**THÉORÈME 4.5.** *Un  $\mathcal{L}$ -feuillement de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$  est à conjugaison près décrit par l'une des formes fermées rationnelles suivantes*

$$Ab(i) \quad z_0^{\lambda_0} z_1^{\lambda_1} z_2^{\lambda_2} z_3^{\lambda_3}$$

$$Ab(ii) \quad \frac{z_1 z_2 + z_0 z_3}{z_1 z_3}$$

$$Ab(iii) \quad \frac{z_1}{z_3} \exp \left( \frac{z_0 z_3 + z_2 z_1}{z_1 z_3} \right)$$

$$Ab(iv) \quad \frac{z_0}{z_3} \exp \left( \frac{z_2^2 - z_1 z_3}{z_3^2} \right)$$

$$Ab(v) \quad \frac{z_1 z_3^{\kappa-1}}{z_0^\kappa} \exp \left( \frac{z_2}{z_3} \right)$$

$$Ab(v) \quad \frac{z_0 z_3^2 + z_1 z_2 z_3 + z_2^3}{z_3^3}$$

$$Af(i) \quad \text{le feuillement exceptionnel donné par}$$

$$\frac{\left( z_0 z_3^2 - z_1 z_2 z_3 + \frac{z_2^3}{3} \right)^2}{\left( z_1 z_3 - \frac{z_2^2}{2} \right)^3}$$

$$Af(ii) \quad \frac{z_0^2 z_3^{2(\kappa-1)}}{(z_1 z_3 - z_2^2)^\kappa}$$

$$Af(iii) \quad \frac{z_3^2}{z_1 z_3 - z_2^2} \exp \left( \frac{z_0}{z_3} \right)$$

$$Af(iv) \quad \frac{z_0}{z_3} \exp \left( \frac{z_2^2 - z_1 z_3}{z_0 z_3} \right)$$

$$\begin{aligned}
Af(v) &= \frac{z_2}{z_3} \exp\left(\frac{z_0 z_3 - z_1 z_2}{z_3^2}\right) \\
Af(vi) &= \frac{(z_0 z_3 - z_1 z_2)^\kappa}{z_2^{\kappa+1} z_3^{\kappa-1}} \\
Af(vii) &= \frac{z_0 z_3 - z_1 z_2}{z_3^2} \exp\left(-\frac{z_2}{z_3}\right)
\end{aligned}$$

où  $\kappa$  et  $\lambda_i \in \mathbf{C}$ .

En particulier, on obtient le théorème annoncé dans l'introduction. Les symboles Ab et Af distinguent les cas abéliens et affines.

La proposition 6 assure qu'un  $\mathcal{L}$ -feuilletage  $\mathcal{F}$  de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$  est associé à une sous-algèbre  $\mathcal{L} \subset \chi(\mathbf{CP}(3))$  de dimension 2. D'après la classification des algèbres de Lie complexes de dimension 2, l'algèbre  $\mathcal{L}$  est soit abélienne, soit isomorphe à l'algèbre de Lie du groupe des transformations affines  $\{z \mapsto az + b\}$ . La démonstration du théorème 4.5 se fait en plusieurs étapes suivant la nature de l'algèbre  $\mathcal{L}$ . Elle procède par classification effective des sous-algèbres de matrices de dimension deux.

Bien que cela n'apparaisse pas directement dans le texte nous avons souvent utilisé le lemme suivant qui permet d'éliminer certaines configurations :

**LEMME 4.6.** *Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(n)$ . Supposons qu'il existe un élément  $X \in \mathcal{L}$  dont la matrice associée est de rang 1. Alors  $\deg \mathcal{F} < n-1$  et il existe une projection  $\tau : \mathbf{CP}(n) \dashrightarrow \mathbf{CP}(n-1)$ , un feuilletage  $\mathcal{F}'$  sur  $\mathbf{CP}(n-1)$  tels que  $\mathcal{F} = \tau^* \mathcal{F}'$ .*

**DÉMONSTRATION.** Soit  $X_1 = X, X_2, \dots, X_{n-1}$  des éléments de  $\mathcal{L}$  tels qu'en un point générique  $m$ , les champs  $R(m), X_1(m), \dots, X_{n-1}(m)$  soient indépendants. La condition de rang entraîne que le champ  $X$  s'écrit

$$\ell X_0$$

où  $\ell$  est une forme linéaire et  $X_0$  un champ constant.

On peut choisir des coordonnées dans lesquelles le champ  $X_0$  est de la forme  $\frac{\partial}{\partial z_0}$  ; on a alors

$$i_R i_{X_0} \dots i_{X_{n-1}} dz_0 \wedge \dots \wedge dz_n = P\omega$$

où  $P$  est un polynôme homogène éventuellement constant et  $\omega$  une 1-forme définissant  $\mathcal{F}$ . On constate que  $\deg \omega < n-1$  et que la 1-forme  $\omega$  ne dépend pas de  $z_0$ .  $\square$

**2.1. L'algèbre  $\mathcal{L}$  est abélienne.** Si  $A$  est une matrice carrée on écrit  $A = A_S + A_N$  où  $A_S$  est semi-simple,  $A_N$  nilpotente et  $[A_S, A_N] = 0$ . Si  $A$  et  $B$  commutent, alors  $[A_S, B_S] = [A_N, B_N] = [A_S, B_N] = [A_N, B_S] = 0$  : c'est la « jordanisation simultanée ».

Par Jordanisation simultanée des matrices, on établit la :

PROPOSITION 4.7. *Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$  associé à une algèbre  $\mathcal{L}$  abélienne. On est à conjugaison près dans l'une des configurations suivantes :*

- (i) *l'algèbre  $\tilde{\mathcal{L}}$  est diagonale,*
- (ii) *l'algèbre  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les champs*

$$z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + (z_2 + z_3) \frac{\partial}{\partial z_2} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad (z_2 + \kappa z_3) \frac{\partial}{\partial z_2} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_3} \text{ et } R,$$

- (iii) *l'algèbre  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les champs*

$$\kappa z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2}, \quad z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_1} \text{ et } R.$$

- (iv) *l'algèbre  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les champs*

$$z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2}, \quad z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + \kappa z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} \text{ et } R,$$

- (v) *l'algèbre  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les champs*

$$z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2}, \quad (z_2 + \kappa z_3) \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_1} \text{ et } R.$$

DÉMONSTRATION. On décrit par jordanisation toutes les algèbres de matrices  $\tilde{\mathcal{L}} = \mathbf{C}R \oplus \mathcal{L}'$  avec  $\mathcal{L}$  abélienne ; si une telle algèbre contient un élément de rang 1 on ne la retient pas (4.6) L'étude se fait « à la main » en examinant la nature du spectre d'un élément générique de  $\tilde{\mathcal{L}}$ . Tous calculs faits on obtient les algèbres suivantes générées par

$$R \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = Id$$

et les matrices de  $X$  et  $Y$  avec



$$(i) \quad X = \begin{pmatrix} \alpha_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_3 \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} \beta_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_3 \end{pmatrix}$$

$$(ii) \quad X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \kappa \neq 1$$

$$(iii) \quad X = \begin{pmatrix} \kappa & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \kappa \neq 1$$

$$(iv) \quad X = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \kappa & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \kappa \neq 0$$

$$(v) \quad X = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & \kappa \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

En prenant les champs de vecteurs associés à ces cinq configurations on obtient la liste annoncée dans la proposition.  $\square$

Nous allons maintenant présenter la liste des intégrales premières des feuilletages associés à ces cinq algèbres.

(i) Cas où  $\tilde{\mathcal{L}}$  est diagonale. Avec les notations précédentes on a

$$X = \sum_{k=0}^3 \alpha_k z_k \frac{\partial}{\partial z_k}, \quad Y = \sum_{k=0}^3 \beta_k z_k \frac{\partial}{\partial z_k} \text{ et } R$$

Le feuilletage  $\mathcal{F}$  est décrit par

$$i_R i_X i_Y dz_0 \wedge dz_1 \wedge dz_2 \wedge dz_3 = z_0 z_1 z_2 z_3 \sum_{k=0}^3 \lambda_k \frac{dz_k}{z_k}$$

avec  $\sum_{k=0}^3 \lambda_k \alpha_k = \sum_{k=0}^3 \lambda_k \beta_k = \sum_{k=0}^3 \lambda_k = 0$ . C'est le cas Ab (i) du théorème 2.1.

(ii) Traitons le cas où  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les trois champs

$$z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + (z_2 + z_3) \frac{\partial}{\partial z_2} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad (z_2 + \kappa z_3) \frac{\partial}{\partial z_2} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_3} \text{ et } R, \quad \kappa \neq 1$$

correspondant à la deuxième configuration de matrices. La 1-forme  $\omega$  annulée par ces trois champs s'écrit

$$(1 - \kappa) z_1 z_3^2 dz_0 + ((\kappa - 1) z_0 - \kappa z_1) z_3^2 dz_1 - z_1^2 z_3 dz_2 + (z_2 + \kappa z_3) z_1^2 dz_3$$

Dans ce cas, on constate que si  $\kappa = 0$ , alors

$$\frac{\omega}{z_1^2 z_3^2} = d \left( \frac{z_0}{z_1} - \frac{z_2}{z_3} \right)$$

qui correspond au premier cas de Ab (ii).

En fait pour tout  $\kappa$ ,  $z_1^2 z_3^2$  est un facteur intégrant de  $\omega$ . On vérifie que

$$-\frac{\omega}{z_1^2 z_3^2} = (\kappa - 1) d \left( \frac{z_0}{z_1} \right) + d \left( \frac{z_2}{z_3} \right) + \kappa \left( \frac{dz_1}{z_1} - \frac{dz_3}{z_3} \right), \quad \kappa \neq 1$$

C'est le cas général de Ab (ii) du théorème 2.1. Une intégrale première du feuilletage décrit par  $\omega$  est

$$(\kappa - 1) \frac{z_0}{z_1} + \frac{z_2}{z_3} + \kappa \log \left( \frac{z_1}{z_3} \right) \text{ ou son exponentielle}$$

autrement dit, à conjugaison près

$$\frac{z_1 z_2 - z_0 z_3}{z_1 z_3} \quad \text{si } \kappa = 0$$

$$\frac{z_1}{z_3} \exp \left( \frac{z_0 z_3 + z_2 z_1}{z_1 z_3} \right) \quad \text{si } \kappa \neq 0$$

On note que lorsque  $\kappa = 1$  le feuilletage correspondant est de degré 1.

(iii) Cas où  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les trois champs

$$\kappa z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2}, \quad z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_1} \text{ et } R$$

correspondant à la troisième configuration de matrices. La 1-forme  $\omega$  annulée par ces trois champs s'écrit à multiplication près

$$\begin{aligned} & -z_3^3 dz_0 + z_0 z_3^2 dz_1 + (\kappa z_0 z_3 - z_0 z_2) z_3 dz_2 \\ & + (z_0 z_3^2 - \kappa z_0 z_2 z_3 - z_0 z_1 z_3 + z_0 z_2^2) dz_3 \end{aligned}$$

Ici encore on trouve un facteur intégrant de  $\omega$  évident :  $z_0 z_3^3$ . On a

$$\frac{\omega}{z_0 z_3^3} = \frac{dz_0}{z_0} - \frac{dz_3}{z_3} + d\left(\frac{z_2^2 - 2\kappa z_2 z_3 - 2z_1 z_3}{2z_3^2}\right)$$

Une intégrale première de cette forme et du feuilletage correspondant est donnée par

$$\frac{z_0}{z_3} \exp\left(\frac{z_2^2 - 2z_1 z_3 - 2\kappa z_2 z_3}{2z_3^2}\right)$$

soit à conjugaison près

$$\frac{z_0}{z_3} \exp\left(\frac{z_2^2 - z_1 z_3}{z_3^2}\right)$$

C'est le cas Ab (iii).

(iv) Cas où  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les trois champs

$$z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2}, \quad z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + \kappa z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} \quad \text{et} \quad R.$$

La 1-forme  $\omega$  annulée par ces trois champs s'écrit à multiplication près

$$-\kappa z_1 z_3^2 dz_0 + z_0 z_3^2 dz_1 - z_0 z_1 z_3 dz_2 + z_0 z_1 ((\kappa - 1)z_3 + z_2) dz_3$$

En cherchant une famille d'applications linéaires laissant le feuilletage invariant, on construit une symétrie et on trouve que la 1-forme  $\omega$  admet pour facteur intégrant  $z_0 z_1 z_3^2$ ; ce que l'on peut constater de visu :

$$\frac{\omega}{z_0 z_1 z_3^2} = -\kappa \frac{dz_0}{z_0} + \frac{dz_1}{z_1} + (\kappa - 1) \frac{dz_3}{z_3} - d\left(\frac{z_2}{z_3}\right)$$

Elle décrit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$  dont une intégrale première est

$$\frac{z_1 z_3^{\kappa-1}}{z_0^\kappa} \exp\left(\frac{z_2}{z_3}\right)$$

Il s'agit du cas Ab (iv).

(v) Cas où  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les trois champs

$$z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2}, \quad (z_2 + \kappa z_3) \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_1} \quad \text{et} \quad R$$

correspondant à la cinquième configuration de matrices. La 1-forme  $\omega$  annulée par ces trois champs s'écrit

$$\begin{aligned} & -z_3^3 dz_0 + z_3^2(z_2 + \kappa z_3) dz_1 + z_3(z_1 z_3 - z_2^2 - \kappa z_2 z_3) dz_2 \\ & + (z_0 z_3^2 - 2z_1 z_2 z_3 + z_2^3 + \kappa z_2^2 z_3 - \kappa z_1 z_3^2) dz_3 \end{aligned}$$

Le polynôme  $z_3^4$  est un facteur intégrant de  $\omega$  et

$$\frac{\omega}{z_3^4} = d \left( -\frac{z_0}{z_3} + \kappa \frac{z_1}{z_3} - \kappa \frac{z_2^2}{2z_3^2} - \frac{z_2^3}{3z_3^3} + \frac{z_1 z_2}{z_3^2} \right)$$

Cette forme décrit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$  dont le lieu singulier est une droite

$$\mathcal{S}ing \mathcal{F} = (z_2 = z_3 = 0)$$

et d'intégrale première

$$\frac{-z_0 z_3^2 + \kappa z_1 z_3^2 + z_1 z_2 z_3 - \frac{z_2^3}{3} - \frac{\kappa z_2^2 z_3}{2}}{z_3^3}$$

Celle-ci s'écrit à conjugaison et composition à gauche par une homographie près

$$\frac{z_0 z_3^2 + z_1 z_2 z_3 + z_2^3}{z_3^3}$$

C'est le cas Ab (v). Dans la carte affine  $z_3 = 1$ , cette intégrale première s'écrit

$$C(z_0, z_1, z_2) = z_0 + z_1 z_2 + z_2^3$$

ce qui nous donne un polynôme de degré 3 induisant un  $\mathcal{L}$ -feuilletage dans  $\mathbf{C}^3$ . On constate que pour tout  $\rho \in \mathbf{C}$ , on a

$$C(\rho^3 z_0, \rho^2 z_1, \rho z_2) = \rho^3 C(z_0, z_1, z_2),$$

en particulier pour  $\rho = e^t$ , on a

$$C(e^{3t} z_0, e^{2t} z_1, e^t z_2) = e^{3t} C(z_0, z_1, z_2).$$

Autrement dit le champ linéaire

$$3z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + 2z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_2}$$

est une symétrie du feuilletage  $\mathcal{F}$  : le feuilletage  $\mathcal{F}$  admet à la fois une intégrale première rationnelle non triviale et une symétrie. Chaque cubique  $z_0 + z_1 z_2 + z_2^3 = \text{cte}$  est une surface réglée : les droites d'équations

$$\begin{cases} z_2 = \mu \\ z_0 + \alpha z_1 = \lambda \end{cases}$$

sont contenues dans cette surface. Lorsqu'on coupe  $\mathbf{CP}(5)$  par le 2-plan  $\{z_5 = z_2, z_1 = z_3\}$ , on constate que le polynôme de Gordan-Noëther homogénéisé

$$\frac{z_0 z_1^2 + z_1 z_2 z_4 + z_2^2 z_5}{z_3^3}$$

coïncide avec l'intégrale première du  $\mathcal{L}$ -feuilletage  $\mathcal{F}$ . Outre le fait que le lieu singulier soit une droite exactement ce dernier fait est remarquable.

**Problème** : classifier les  $\mathcal{L}$ -feuilletages de  $\mathbf{CP}(n)$  qui ont pour ensemble singulier un sous-espace linéaire de codimension 2. Les feuilletages de degré 0 en font partie ; pour  $n = 3$ , y a-t-il d'autres exemples que le précédent ?

**2.2. L'algèbre  $\mathcal{L}$  est isomorphe à l'algèbre du groupe des transformations affines.** Pour classifier les feuilletages de degré 2 associés à une algèbre de Lie isomorphe à l'algèbre du groupe des transformations affines, on va classifier les algèbres de Lie engendrées par deux champs linéaires  $X$  et  $Y$  de  $\mathbf{C}^4$  satisfaisant  $[X, Y] = Y$ . Comme l'algèbre  $\langle X, Y \rangle$  est résoluble, par triangulation on constate que  $Y$  est nilpotent. D'après le lemme 4.6 le rang de la matrice associée au champ  $Y$  est 2 ou 3, le cas où  $Y$  est de rang 1 n'est donc pas retenu.

Commençons par supposer que le rang de la matrice associée au champ  $Y$  est 3, notons  $-A$  la matrice de  $X$  et  $B$  celle de  $Y$ . Comme  $B$  est nilpotente de rang 3 elle s'écrit à conjugaison près

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

On remarque que la matrice

$$A_0 = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

satisfait  $A_0 B - B A_0 = B$  ; par suite la matrice  $A - A_0$  commute à  $B$ . Du calcul direct du commutateur de  $B$ , on déduit que  $A$  est du type

$$\begin{pmatrix} \lambda + 3 & \kappa_1 & \kappa_2 & \kappa_3 \\ 0 & \lambda + 2 & \kappa_1 & \kappa_2 \\ 0 & 0 & \lambda + 1 & \kappa_1 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}$$

En particulier  $A$  est diagonalisable donc s'écrit à conjugaison près

$$\begin{pmatrix} \lambda + 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda + 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda + 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}$$

Une matrice  $B$  satisfaisant  $AB - BA = B$  est alors de la forme

$$\begin{pmatrix} 0 & \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Comme  $B$  est supposé être de rang 3, les  $\beta_i$  sont non nuls donc égaux à 1 à conjugaison près. Finalement le  $\mathcal{L}$ -feuilletage correspondant est dans des coordonnées homogènes bien choisies tangent aux champs

$$R = \sum_{i=0}^3 z_i \frac{\partial}{\partial z_i}, \quad X = 3z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + 2z_2 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_3}$$

et  $Y = z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2}$

Il s'agit du feuilletage exceptionnel qui admet pour intégrale première

$$\frac{\left(z_0 z_3^2 - z_1 z_2 z_3 + \frac{z_3^3}{3}\right)^2}{\left(z_1 z_3 - \frac{z_2^2}{2}\right)^3}$$

C'est le cas Af (i).

Supposons maintenant que la matrice associée au champ  $Y$  soit de rang 2. Il y a à conjugaison près deux types de matrices  $(4, 4)$  nilpotentes de rang 2

$$B_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad B_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

### 2.2.1. Cas $B = B_1$ .

L'égalité  $[A, B] = B$  entraîne que  $A$  s'écrit sous la forme

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & \kappa_4 \\ \kappa_5 & 2 + \lambda & \kappa_7 & \kappa_8 \\ 0 & 0 & 1 + \lambda & \kappa_7 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}$$

Puisqu'on s'intéresse à l'algèbre engendrée par les champs  $X$ ,  $Y$  et  $R$  on peut supposer que  $\kappa_7 = 0$ . Remarquons qu'avec les notations habituelles un changement de base  $e_0 \rightarrow e_0 + \alpha e_1$  n'altère pas la matrice  $B$ . Par suite si  $\lambda_1 \neq 2 + \lambda$ , on peut supposer que  $A$  est du type

$$A_1 = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & \kappa_4 \\ 0 & 2 + \lambda & 0 & \kappa_8 \\ 0 & 0 & 1 + \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}$$

et sinon du type

$$A_2 = \begin{pmatrix} 2 + \lambda & 0 & 0 & \kappa_4 \\ \kappa_5 & 2 + \lambda & 0 & \kappa_8 \\ 0 & 0 & 1 + \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}$$

a. Si  $\lambda_1 \neq 2 + \lambda$ , on fait le changement de base

$$e_4 \rightarrow e_4 + ae_1 + be_2 = e'_4$$

(qui n'altère pas  $B$ ) pour obtenir  $Ae'_4 = \lambda e'_4$  soit encore

$$a(\lambda_1 - \lambda) + \kappa_4 = 0$$

$$2b + \kappa_8 = 0$$

Ainsi si  $\lambda \neq \lambda_1$ , on peut par conjugaison éliminer  $\kappa_4$  et  $\kappa_8$ , sinon on peut éliminer  $\kappa_8$ .

a.1. Si  $\lambda \neq \lambda_1$ , on se ramène à une algèbre du type

$$R, Y = z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2}, X = \kappa z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + 2z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_2}$$

Les hyperplans  $z_3 = \text{cte}$  sont invariants par les deux champs  $X$  et  $Y$ ; ainsi ces deux champs engendrent le feuilletage restreint à la carte affine  $z_3 = 1$ ; ils s'écrivent

$$\tilde{X} = X|_{z_3=1} = \kappa z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + 2z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_2}$$

$$\tilde{Y} = Y|_{z_3=1} = z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + \frac{\partial}{\partial z_2}$$

Le champ  $\tilde{Y}$  a une « partie constante »; nous allons essayer de le redresser par un automorphisme polynomial. Le flot de  $\tilde{Y}$  est

$$\varphi : (z; t) \mapsto (z_0, z_1 + z_2 t + \frac{t^2}{2}, z_2 + t)$$

On définit maintenant le difféomorphisme

$$H : (z_0, z_1, z_2) \mapsto \varphi(z_0, z_1, 0; z_2) = (z_0, z_1 + \frac{z_2^2}{2}, z_2)$$

Par construction  $H$  conjugue  $\frac{\partial}{\partial z_2}$  à  $\tilde{Y}$ . Le feuilletage  $\mathcal{F}'$  associé à l'algèbre engendrée par les champs  $H_*^{-1}\tilde{X}$  et  $H_*^{-1}\tilde{Y}$  est décrit par une 1-forme  $\Omega'$  qui, en particulier, annule le champ  $H_*^{-1}\tilde{Y} = \frac{\partial}{\partial z_2}$  donc s'écrit

$$A'(z_0, z_1)dz_0 + B'(z_0, z_1)dz_1$$

Le difféomorphisme  $H$  laisse le plan  $z_2 = 0$  invariant point par point. On constate que le champ

$$\tilde{X}|_{z_2=0} = \kappa z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + 2z_1 \frac{\partial}{\partial z_1}$$

est tangent au feuilletage et au plan  $z_2 = 0$ ; il décrit donc le feuilletage en restriction au plan  $z_2 = 0$ . On déduit une intégrale première du champ  $\tilde{X}$

$$\frac{z_0^2}{z_1^\kappa}$$

et donc de  $\mathcal{F}'$ . Ce qui donne après composition par  $H^{-1}$  et homogénéisation l'intégrale première de  $\mathcal{F}$  suivante :

$$\frac{z_0^2 z_3^{2(\kappa-1)}}{\left(z_1 z_3 - \frac{z_2^2}{2}\right)^\kappa}$$

C'est le cas Af (ii).

a.2. Si  $\lambda = \lambda_1$ , l'algèbre  $\mathcal{L}$  est engendrée par

$$R, \quad z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2}, \quad \kappa_4 z_3 \frac{\partial}{\partial z_0} + 2z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_2}$$

Si  $\kappa_4 = 0$  alors les champs  $\frac{\partial}{\partial z_1}$  et  $\frac{\partial}{\partial z_2}$  sont tangents au feuilletage qui ne peut donc être un feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(3)$ ; par homothétie on peut donc se ramener à  $\kappa_4 = 1$ .

Par la même méthode que précédemment, en redressant  $z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2}$  dans la carte affine  $z_3 = 1$ , on montre que le feuilletage  $\mathcal{F}$  admet pour intégrale première

$$\frac{z_3^2}{2z_1 z_3 - z_2^2} \exp\left(\frac{2z_0}{z_3}\right)$$

ce qui donne le cas Af (iii) à conjugaison près.

b. Si  $\lambda_1 = 2 + \lambda$ , par un changement de base

$$e_4 \rightarrow e_4 + ae_1 + be_2$$



on peut se ramener à  $\kappa_4 = \kappa_8 = 0$ . En effet,

$$A_2(e_4 + ae_1 + be_2) = 0$$

équivalent à

$$a = -\frac{\kappa_4}{2}, \quad b = \frac{a\kappa_4\kappa_5 - 2\kappa_8}{4}$$

Par homothétie on se ramène à  $\kappa_5 = 0$  ou 1.

Commençons par traiter le cas  $\kappa_5 = 0$ ; alors l'algèbre  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les champs

$$R, \quad z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} \quad \text{et} \quad 2z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + 2z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_2}$$

qui est un cas particulier du cas a.1. ( $\kappa = 2$ )

Finalement traitons le cas  $\kappa_5 = 1$ ; l'algèbre  $\tilde{\mathcal{L}}$  est du type

$$R, \quad z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} \quad \text{et} \quad 2z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + (z_0 + 2z_1) \frac{\partial}{\partial z_1} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_2}$$

Toujours par la même méthode (qui consiste à redresser le champ  $z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2}$  dans la carte affine  $z_3 = 1$ ) on montre que le feuilletage  $\mathcal{F}$  admet pour intégrale première

$$\frac{z_0}{z_3} \exp \left( \frac{z_2^2 - 2z_1 z_3}{z_0 z_3} \right)$$

on obtient le cas Af (iv) à conjugaison près.

### 2.2.2. Cas $B = B_2$ .

Ce cas est caractérisé par  $\ker B = \operatorname{im} B$  et  $B$  est un isomorphisme de  $\langle e_2, e_3 \rangle$  dans  $\langle e_0, e_1 \rangle$ . En particulier pour chaque base  $f_0, f_1$  de  $\ker B$ , il existe une base  $f_2, f_3$  de  $\langle e_2, e_3 \rangle$  telle que  $Bf_2 = f_0$  et  $Bf_3 = f_1$ . L'égalité  $AB - BA = B$  implique que  $\ker B$  est invariant par  $A$ . On peut donc supposer que l'on a une base  $e_0, e_1, e_2, e_3$  dans laquelle  $A$  et  $B$  sont du type suivant (on jordanise la restriction de  $A$  à  $\ker B$ )

$$A = A_1 = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & * & * \\ 0 & \lambda_2 & * & * \\ 0 & 0 & * & * \\ 0 & 0 & * & * \end{pmatrix} \quad \text{avec } \lambda_1 \neq \lambda_2 \quad \text{ou} \quad A = A_2 = \begin{pmatrix} \lambda & \varepsilon & * & * \\ 0 & \lambda & * & * \\ 0 & 0 & * & * \\ 0 & 0 & * & * \end{pmatrix}$$

$$\text{et } B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

On remarque que par homothétie on se ramène à  $\varepsilon \in \{0, 1\}$ .

c.  $A$  est du type  $A_1$ .

On a

$$ABe_3 - B Ae_3 = Be_3 \Leftrightarrow B Ae_3 = (\lambda_2 - 1)Be_3$$

Il en résulte que

$$Ae_3 = \kappa_3 e_0 + \kappa_5 e_1 + (\lambda_2 - 1)e_3$$

De la même façon, on obtient

$$Ae_2 = \kappa_2 e_0 + \kappa_4 e_1 + (\lambda_1 - 1)e_2$$

et

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \kappa_2 & \kappa_3 \\ 0 & \lambda_2 & \kappa_4 & \kappa_5 \\ 0 & 0 & \lambda_1 - 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_2 - 1 \end{pmatrix}$$

On note que les changements de base du type

$$e_2 \rightarrow e_2 + \alpha e_0 + \beta e_1 = \underline{e_2}$$

$$e_3 \rightarrow e_3 + \gamma e_0 + \delta e_1 = \underline{e_3}$$

n'altèrent ni  $B$ , ni la forme de  $A$ . On a avec les notations précédentes

$$A\underline{e_2} - (\lambda_1 - 1)\underline{e_2} = (\kappa_2 + \alpha)e_0 + (\beta(\lambda_2 - \lambda_1 + 1) + \kappa_4)e_1$$

$$A\underline{e_3} - (\lambda_2 - 1)\underline{e_3} = (\kappa_3 + \gamma(\lambda_1 - \lambda_2 + 1))e_0 + (\delta + \kappa_5)e_1$$

On constate qu'en choisissant  $\delta = -\kappa_5$  et  $\alpha = -\kappa_2$ , on peut supposer que  $\kappa_2 = \kappa_5 = 0$ ; de plus si  $\lambda_2 - \lambda_1 \neq \pm 1$ , on peut supposer que  $\kappa_3 = \kappa_4 = 0$ .

En enlevant  $(\lambda_2 - 1)R$  à  $X$  représenté par la matrice  $A$ , on se ramène au cas où l'algèbre  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par  $R$  et les trois champs

$$z_2 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_1}, ((\mu + 1)z_0 + \kappa_3 z_3) \frac{\partial}{\partial z_0} + (z_1 + \kappa_4 z_2) \frac{\partial}{\partial z_1} + \mu z_2 \frac{\partial}{\partial z_2}$$

où  $\mu = \lambda_1 - \lambda_2$  ( $\neq 0$  par hypothèse).

On va suivre la méthode utilisée précédemment mais nous la détaillerons car elle est ici un peu plus technique. Comme l'hyperplan  $z_3 = 0$  est invariant par tous ces champs on se place dans la carte affine  $z_3 = 1$  où l'on a

$$\tilde{Y} = Y|_{z_3=1} = z_2 \frac{\partial}{\partial z_0} + \frac{\partial}{\partial z_1}$$

$$\tilde{X} = X|_{z_3=1} = ((\mu + 1)z_0 + \kappa_3) \frac{\partial}{\partial z_0} + (z_1 + \kappa_4 z_2) \frac{\partial}{\partial z_1} + \mu z_2 \frac{\partial}{\partial z_2}$$

L'hyperplan  $z_1 = 0$  est transverse à  $\tilde{Y}$  donc au feuilletage  $\mathcal{F}$ . Notons

$$\varphi(z_0, z_1, z_2; t) = (z_0 + tz_2, z_1 + t, z_2)$$

le flot de  $\tilde{Y}$ , alors le difféomorphisme

$$H(z_0, z_1, z_2) = \varphi(z_0, 0, z_2; z_1) = (z_0 + z_1 z_2, z_1, z_2)$$

redresse le champ  $\tilde{Y}$  sur  $\frac{\partial}{\partial z_1}$  et trivialise le feuilletage. Dans l'hyperplan  $z_1 = 0$ , le feuilletage  $\mathcal{F}|_{z_1=0}$  est donné par

$$(\tilde{X} - \kappa_4 z_2 \tilde{Y})|_{z_1=0} = ((\mu + 1)z_0 + \kappa_3 - \kappa_4 z_2^2) \frac{\partial}{\partial z_0} + \mu z_2 \frac{\partial}{\partial z_2}$$

La 1-forme

$$\bar{\omega} = \mu z_2 dz_0 - ((\mu + 1)z_0 + \kappa_3 - \kappa_4 z_2^2) dz_2$$

décrit donc  $\mathcal{F}|_{z_1=0}$ .

c.1. Si  $\mu = -1$ , le feuilletage restreint est décrit par la 1-forme

$$d\left(z_0 - \frac{\kappa_4}{2} z_2^2\right) + \kappa_3 \frac{dz_2}{z_2}$$

d'où une intégrale première, si  $\kappa_3 \neq 0$ , du type :

$$z_2 \exp\left(\frac{z_0}{\kappa_3} - \frac{\kappa_4}{2\kappa_3} z_2^2\right)$$

ce qui donne après composition avec  $H^{-1}$  et homogénéisation

$$\frac{z_2}{z_3} \exp\left(\frac{2z_0 z_3 - 2z_1 z_2 - \kappa_4 z_2^2}{2\kappa_3 z_3^2}\right)$$

qui correspond au cas Af (v) à conjugaison près. Si  $\kappa_3 = 0$ , le feuilletage est de degré 1.

c.2. Si  $\mu \neq \pm 1$ , puisqu'on peut se ramener à  $\kappa_3 = \kappa_4 = 0$ , on a

$$\bar{\omega} = \mu z_2 dz_0 - (\mu + 1) z_0 dz_2$$

On en déduit, pour le feuilletage restreint à  $z_1 = 0$ , l'intégrale première suivante

$$\frac{z_0^\mu}{z_2^{\mu+1}}$$

Après composition par  $H^{-1}$  et homogénéisation, le feuilletage admet pour intégrale première

$$\frac{(z_0 z_3 - z_1 z_2)^\mu}{z_2^{\mu+1} z_3^{\mu-1}}$$

qui donne le cas Af (vi).

c.3. Si  $\mu = 1$ , la 1-forme  $\bar{\omega}$  s'écrit

$$z_2 dz_0 - (2z_0 + \kappa_3 - \kappa_4 z_2^2) dz_2$$

Quitte à composer  $\bar{\omega}$  par

$$\phi : (z_0, z_2) \mapsto (z_0 - \frac{\kappa_3}{2}, z_2)$$

on a

$$\bar{\omega} = z_2 dz_0 - (2z_0 - \kappa_4 z_2^2) dz_2$$

ou encore, à multiplication près :

$$d\left(\frac{z_0}{z_2^2}\right) + \kappa_4 \frac{dz_2}{z_2}$$

d'où l'intégrale première ( $\kappa_4 \neq 0$  sinon le degré chute)

$$z_2 \exp\left(\frac{z_0}{\kappa_4 z_2^2}\right)$$

Ce qui donne après composition avec  $\phi^{-1}$ ,  $H^{-1}$  et homogénéisation

$$\frac{z_2}{z_3} \exp\left(\frac{2z_0 z_3 - 2z_1 z_2 + \kappa_3 z_3^2}{2\kappa_4 z_2^2}\right)$$

Quitte à permuter  $z_2$  et  $z_3$  puis  $z_0$  et  $z_1$  on retombe sur le cas c.1.

d. Supposons que  $A$  est du type  $A_2$ .

Si  $\varepsilon = 0$ , alors  $\mu = 0$  et en reprenant les calculs précédents, on constate que le degré du feuilletage chute.

Si  $\varepsilon = 1$ , alors on a

$$ABe_2 - B Ae_2 = Be_2 \Leftrightarrow B Ae_2 = (\lambda - 1)Be_2$$

Il en résulte que

$$Ae_2 = \kappa_2 e_0 + \kappa_4 e_1$$

De la même façon, on obtient

$$Ae_3 = \kappa_3 e_0 + \kappa_5 e_1 + e_2 + (\lambda - 1)e_3$$

et

$$A = \begin{pmatrix} \lambda & 1 & \kappa_2 & \kappa_3 \\ 0 & \lambda & \kappa_4 & \kappa_5 \\ 0 & 0 & \lambda - 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda - 1 \end{pmatrix}$$

On note que les changements de base du type

$$e_2 \rightarrow e_2 + \alpha e_0 + \beta e_1 = \underline{e_2}$$

$$e_3 \rightarrow e_3 + \gamma e_0 + \delta e_1 = \underline{e_3}$$

n'altèrent ni  $B$ , ni la forme de  $A$ . On a

$$A\underline{e_2} - (\lambda - 1)\underline{e_2} = (\kappa_2 + \alpha + \beta)e_1 + \kappa_4 + \beta$$

Donc quitte à prendre  $\beta = -\kappa_4$  et  $\alpha = \kappa_4 - \kappa_2$ , on peut supposer que  $\kappa_2 = \kappa_4 = 0$ . On a alors

$$A\underline{e_3} - (\lambda - 1)\underline{e_3} - \underline{e_2} = (\kappa_3 + \delta + \gamma)e_1 + (\kappa_5 + \delta)e_2$$

Puis quitte à prendre  $\delta = -\kappa_5$  et  $\gamma = \kappa_5 - \kappa_3$ , on se ramène à  $\kappa_3 = \kappa_5 = 0$ . Finalement à conjugaison près  $A$  s'écrit

$$\begin{pmatrix} \lambda & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda - 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda - 1 \end{pmatrix}$$

et notre feuilletage est tangent aux champs de vecteurs

$$R, \quad Y = z_2 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_1} \quad \text{et} \quad X = (z_0 + z_1) \frac{\partial}{\partial z_0} + z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2}$$

Comme l'hyperplan  $z_3 = 0$  est invariant par tous ces champs on se place dans la carte affine  $z_3 = 1$  où la restriction de notre feuilletage à  $z_1 = 0$  est donné par le champ

$$z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + \frac{\partial}{\partial z_2}$$

autrement dit par l'intégrale première

$$z_0 \exp(-z_2)$$

Après composition par  $H^{-1}$  et homogénéisation, on constate que notre feuilletage admet pour intégrale première

$$\frac{z_0 z_3 - z_1 z_2}{z_3^2} \exp\left(-\frac{z_2}{z_3}\right)$$

c'est le cas Af (vii).



## CHAPITRE 5

### $\mathcal{L}$ -feuilletages quadratiques sur $\mathbf{CP}(n)$ .

L'étude des  $\mathcal{L}$ -feuilletages de codimension 1 sur  $\mathbf{CP}(n)$  pour  $n \geq 4$  s'avère délicate, non seulement pour des raisons de taille de calculs mais aussi pour des raisons conceptuelles. Bien sûr nous savons qu'en degrés 0 et 1 tous les feuilletages de codimension 1 sont des  $\mathcal{L}$ -feuilletages. Par contre déjà en degré 2 on se heurte au problème suivant : majorer la dimension de  $\mathcal{L}$ . Nous avons vu qu'en degré maximal  $n - 1$  la dimension de  $\mathcal{L}$  est précisément  $n - 1$  ce qui permet tout du moins en petite dimension d'espérer une classification en se référant à la description des algèbres de Lie. Nous la présentons en dimension 4.

#### 1. $\mathcal{L}$ -feuilletages quadratiques sur $\mathbf{CP}(n)$ , $n \geq 4$ .

Nous donnons quelques propriétés générales susceptibles d'être utiles pour classifier les  $\mathcal{L}$ -feuilletages de degré 2. La plupart sont conséquences de la description générale des feuilletages de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(n)$  faite dans [3] et que nous avons présentée dans le cas  $n = 3$  (chapitre 4). Nous donnerons aussi quelques exemples.

**PROPOSITION 5.1.** *Soit  $\mathcal{F}$  un feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(n)$  défini en coordonnées homogènes par la 1-forme  $\omega \in \Omega_3^1(\mathbf{C}^{n+1})$ . On est dans l'une des situations suivantes :*

1.  $\mathcal{F}$  est exceptionnel, i.e. il existe  $\tau : \mathbf{CP}(n) \dashrightarrow \mathbf{CP}(3)$  linéaire telle que  $\mathcal{F} = \tau^* \mathcal{F}_\Gamma$
2. Il existe un feuilletage  $\mathcal{F}'$  de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(2)$ , une application linéaire  $\tau : \mathbf{CP}(n) \dashrightarrow \mathbf{CP}(2)$  tels que  $\mathcal{F} = \tau^* \mathcal{F}'$ .
3.  $\mathcal{F}$  a une intégrale première du type  $\frac{Q_1}{Q_2}$  où  $Q_1$  et  $Q_2$  sont des formes quadratiques.
4.  $\mathcal{F}$  possède un hyperplan invariant  $\mathcal{H}$  et  $\omega$  un facteur intégrant de l'un des types suivants :

- 4.1.  $L_1^4$
- 4.2.  $L_1^3 L_2$
- 4.3.  $L_1^2 L_2^2$

4.4.  $L_1^2 L_2 L_3$ 4.5.  $L_1 L_2 L_3 L_4$ 4.6.  $L_1^2 Q$ 4.7.  $L_1 L_2 Q$ 4.8.  $L_1 C$ 

où les  $L_i$  désignent des formes linéaires distinctes,  $Q$  une forme quadratique et  $C$  une cubique.

DÉMONSTRATION. C'est une application directe de [3]. □

REMARQUE. A partir des facteurs intégrants on peut évidemment donner les différents types possibles d'intégrales premières.

On sait que dans le cas des feuilletages exceptionnels, il s'agit de  $\mathcal{L}$ -feuilletages.

Par contre la proposition 3.7 assure que dans le cas 2,  $\mathcal{F}$  n'est jamais un  $\mathcal{L}$ -feuilletage.

Dans le cas 3 où  $\mathcal{F}$  possède une intégrale première  $\frac{Q_1}{Q_2}$ , alors si  $\mathcal{F}$  est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage, les formes quadratiques  $Q_1$  et  $Q_2$  ne peuvent être génériques. En effet, si  $Q_1$  et  $Q_2$  sont génériques, alors la surface  $Q_1 = Q_2 = 0$  est une surface de Del Pezzo ; ceci implique par un argument déjà rencontré dans la preuve du lemme 4.3 qu'il ne peut y avoir de champ de vecteurs tangent à la fois aux niveaux de  $Q_1$  et de  $Q_2$ .

### 1.1. Exemples de type 4.2. Ils se traitent relativement aisément :

PROPOSITION 5.2. *Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(4)$  ayant une intégrale première du type  $z_1 \exp H$ ,  $\deg H = 2$ , dans une carte affine ad-hoc. Alors à conjugaison près  $H$  est de l'un des types suivants*

$$\begin{aligned} & z_2 + z_3 z_4 \\ & z_2 + z_3^2 \\ & z_2 + z_1 z_3 + z_4^2 \end{aligned}$$

DÉMONSTRATION. On remarque qu'un champ affine  $X$  annulant  $\frac{dz_1}{z_1} + dH$  est nécessairement du type

$$X = \lambda z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + Z$$



où

$$Z \in \left\langle \frac{\partial}{\partial z_2}, \frac{\partial}{\partial z_3}, \frac{\partial}{\partial z_4} \right\rangle$$

D'autre part pour que  $\mathcal{F}$  soit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage il est nécessaire que pour l'un des  $X$ ,  $\lambda$  soit non nul disons égal à 1. En écrivant que

$$1 + (\lambda z_1 \frac{\partial H}{\partial z_1} + Z(H)) = 0$$

on constate que  $H(0, z_2, z_3, z_4)$  est un polynôme quadratique qui est nécessairement une submersion. Par suite quitte à changer les coordonnées on peut supposer que

$$H(0, z_2, z_3, z_4) = z_2 + q(z_3, z_4)$$

où  $q$  est une forme quadratique en  $z_3, z_4$ . On remarque aussi que  $H$  n'a pas de terme en  $z_1^2$  si bien que

$$H = z_2 + z_1 L(z_2, z_3, z_4) + q(z_3, z_4)$$

On examine les cas où  $L \equiv 0$ ,  $L = z_2$ ,  $L = z_2 + z_3$ ,  $L = z_3$  qui couvrent à conjugaison près tous les autres.

Dans la première éventualité, toujours à conjugaison près, on peut supposer que

$$H = z_2 + z_3 z_4$$

ou bien

$$H = z_2 + z_3^2$$

Dans ces deux cas, un calcul élémentaire montre qu'il s'agit bien de  $\mathcal{L}$ -feuilletages, le second apparaissant comme un pull-back linéaire d'un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(3)$ .

Considérons le cas où

$$H = z_2 + z_1 z_2 + z_1 z_3 + q(z_3, z_4)$$

Avec les notations précédentes si  $X = z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + Z$ , avec  $Z = \sum_{i=2}^4 A_i \frac{\partial}{\partial z_i}$ , est tangent à  $\mathcal{F}$ , on obtient

$$1 + z_1 z_2 + A_2 + A_3 \left( z_1 + \frac{\partial q}{\partial z_3} \right) + A_4 \frac{\partial q}{\partial z_4} \equiv 0$$

En posant  $q = az_3^2 + bz_3 z_4 + cz_4^2$  on obtient

$$(1 + z_1 z_2) + A_2 + A_3(z_1 + 2az_3 + bz_4) + A_4(bz_3 + 2cz_4) \equiv 0$$

Sur l'intersection des deux hyperplans

$$z_1 + 2az_3 + bz_4 = 0$$

et

$$bz_3 + 2cz_4 = 0$$

on a

$$(1 - (2az_3 + bz_4)z_2) + f \equiv 0$$

où  $f$  est affine donc  $a = b = 0$ . Finalement à conjugaison près on a

$$H = z_2 + z_1z_3 + \kappa z_4^2$$

avec  $\kappa \in \{0, 1\}$ . On constate que  $\mathcal{F}$  est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage puisqu'on trouve parmi les champs tangents à  $\mathcal{F}$  :

$$z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} - \frac{\partial}{\partial z_2} - z_3 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad z_1 \frac{\partial}{\partial z_2} - \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad 2\kappa z_4 \frac{\partial}{\partial z_2} - \frac{\partial}{\partial z_4}$$

□

**1.2. Un cas spécial.** Voici une méthode qui pourrait s'avérer fructueuse en particulier dans l'étude du cas quadratique. Considérons  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(4)$  ayant une intégrale première de type  $\frac{Q_1}{Q_2}$  avec  $Q_i$  formes quadratiques. Supposons l'algèbre  $\mathcal{L}$  non nilpotente ; alors  $\mathcal{L}'$  contient un champ  $X$  semi-simple :

$$X = \sum_{i=0}^k \lambda_i z_i \frac{\partial}{\partial z_i} \quad \lambda_i \neq 0$$

On peut supposer  $k \geq 1$  sinon  $\mathcal{F}$  serait un pull-back. Examinons le cas où  $rg X = 2$ , i.e.  $k = 1$  :

$$X = \lambda_0 z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + \lambda_1 z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} \quad \lambda_0 \lambda_1 \neq 0$$

Soit  $Q$  une forme quadratique annulée par  $X$  ; alors  $Q$  s'écrit

$$\varepsilon z_0 z_1 + q(z_2, z_3, z_4)$$

Remarquons que  $X(Q_1) = X(Q_2) = 0$ . On se ramène à étudier les cas

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{q_1}{q_2}$$

et

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{z_0 z_1 + q_1(z_2, z_3, z_4)}{q_2(z_2, z_3, z_4)}$$

Dans le premier cas  $\mathcal{F}$  est un pull-back. Dans le second cas, on va faire une discussion suivant le rang de  $q_2$ .

Si  $rg q_2 = 1$ , i.e.  $q_2 = z_2^2$  (à conjugaison près) alors  $\mathcal{F}$  est en fait de degré un.

Supposons  $q_2$  de rang 3, autrement dit de la forme  $z_2^2 + z_3^2 + z_4^2$ ; on doit trouver un champ  $Y$  annulant dénominateur et numérateur. Un tel champ s'écrit

$$Y = A_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + A_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + B_2 \frac{\partial}{\partial z_2} + B_3 \frac{\partial}{\partial z_3} + B_4 \frac{\partial}{\partial z_4} = A + B$$

L'égalité  $A(z_0 z_1) = 0$  implique que

$$A = \lambda \left( z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} - z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} \right)$$

On a aussi

$$B(q_1) = B(q_2) = 0$$

En particulier on peut voir  $B$  dans  $so(3, \mathbf{C})$ . Mais tous les éléments non nuls de  $so(3, \mathbf{C})$  sont conjugués (à multiplication près). On peut donc supposer que

$$B = z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} - z_2 \frac{\partial}{\partial z_3}$$

et

$$q_1 = a(z_2^2 + z_3^2) + bz_4^2$$

Il nous faut pour des raisons de dimension ponctuelle trouver un troisième champ  $B'$  annulant  $q_1$  et  $q_2$  du type précédent. Par suite tout champ annulant  $q_2$  annule  $q_1$  et  $q_1 = \alpha q_2$ . Finalement  $\mathcal{F}$  possède une intégrale première du type

$$\frac{z_0 z_1}{z_2^2 + z_3^2 + z_4^2}$$

que nous avons d'ailleurs rencontrée dans le principe de construction d'exemple.

Terminons par le cas où  $rg\ q_2 = 2$ , i.e.  $q_2 = z_2^2 + z_3^2$ . En suivant la démarche précédente on doit trouver deux champs du type

$$Y_i = z_2 \frac{\partial}{\partial z_3} - z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} + L_i \frac{\partial}{\partial z_4} \quad i = 1, 2$$

indépendants c'est-à-dire, en particulier, non  $\mathbf{C}$ -colinéaires et annulant  $q_1$ ; ceci n'est possible que si  $\frac{\partial}{\partial z_4}$  annule  $q_1$  cas où  $\mathcal{F}$  est un pull-back.

**1.3. Exemple de type 3.** On considère un feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(4)$  ayant pour intégrale première

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{z_0^2 + z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 + z_4^2}{\lambda_0 z_0^2 + \lambda_1 z_1^2 + \lambda_2 z_2^2 + \lambda_3 z_3^2 + \lambda_4 z_4^2}$$

On peut supposer que  $\lambda_0 = 0$ ,  $\lambda_4 = 1$  et qu'un autre  $\lambda_i$  est non nul sinon le feuilletage serait de degré 1. Les champs  $X$  qui annulent  $Q_1$  sont du type

$$\sum_{0 \leq i < j \leq 4} \mu_{i,j} \left( z_i \frac{\partial}{\partial z_j} - z_j \frac{\partial}{\partial z_i} \right)$$

Si de plus  $X$  annule  $Q_2$ , on a

$$\sum_{0 \leq i < j \leq 4} \mu_{i,j} (\lambda_i - \lambda_j) z_i z_j = 0$$

Si  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  et  $\lambda_3$  sont non nuls et différents de 1, on aura

$$\mu_{0,j} = 0 \text{ pour } j = 0, \dots, 4$$

$$\mu_{i,4} = 0 \text{ pour } i = 1, 2, 3$$

Ainsi un champ  $X$  qui annule  $Q_1$  et  $Q_2$  n'a pas de composante sur  $\frac{\partial}{\partial z_0}$  et sur  $\frac{\partial}{\partial z_4}$ . La condition de dimension ponctuelle pour l'algèbre des champs annulant  $Q_1$  et  $Q_2$  ne peut être satisfaite. On peut donc supposer toujours sous l'hypothèse  $\lambda_1 \lambda_2 \neq 0$  que  $\lambda_3 = 1$ . Si  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont encore différents de 1, on aura toujours pour  $X$  annulant  $Q_1$  et  $Q_2$  les égalités

$$\mu_{0,j} = \mu_{1,4} = \mu_{2,4} = \mu_{1,3} = \mu_{2,3} = 0$$

et  $X$  sera du type

$$\mu_{1,2} \left( z_1 \frac{\partial}{\partial z_2} - z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} \right) + \mu_{3,4} \left( z_3 \frac{\partial}{\partial z_4} - z_4 \frac{\partial}{\partial z_3} \right)$$

ce qui est insuffisant pour obtenir la dimension ponctuelle souhaitée. Par suite on peut supposer  $\lambda_2 = 1$ . On se ramène donc à

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{z_0^2 + z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 + z_4^2}{z_0^2 + \lambda z_1^2}$$

Comme  $\lambda \neq 0$ , on constate que la seule possibilité est  $\lambda = 1$ . Le feuilletage a donc une intégrale première de type

$$\frac{z_2^2 + z_3^2 + z_4^2}{z_0^2 + z_1^2}$$

vue dans le principe de construction d'exemples et dans le cas spécial précédent. On démontre de façon analogue que les autres configurations de  $\lambda$  conduisent au même modèle. D'où la :

**PROPOSITION 5.3.** *Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(4)$  ayant une intégrale première  $\frac{Q_1}{Q_2}$  où les  $Q_i$  sont des formes quadratiques diagonales.*

Si l'élément générique du pinceau  $Q_1 - \kappa Q_2$  est de rang maximum, alors  $\mathcal{F}$  a une intégrale première du type

$$\frac{z_2^2 + z_3^2 + z_4^2}{z_0^2 + z_1^2}$$

REMARQUE. Un pinceau de formes quadratiques diagonales  $Q_1 = \sum_{i=0}^k z_i^2$ ,  $Q_2 = \sum_{i=0}^n \lambda_i z_i^2$  tel que l'élément générique ne soit pas de rang maximal satisfait

$$\lambda_i = 0 \text{ pour } i > k$$

En particulier le feuilletage associé est un pull-back.

**1.4.** Lors de l'examen de certaines configurations de  $\mathcal{L}$ -feuilletages de degré trois sur  $\mathbf{CP}(4)$  associés à des algèbres résolubles de dimension trois, nous avons trouvé quelques dégénérescences conduisant à des  $\mathcal{L}$ -feuilletages de degré deux possédant des intégrales premières du type  $\frac{Q_1}{Q_2}$  avec  $Q_i$  forme quadratique ; précisément soient

$$\begin{aligned} Q_1 &= z_0 z_4 - p_1 z_3^2 - p_2 z_3 z_4 - \frac{1}{2} z_2^2 + p_3 z_4^2 \\ Q_2 &= z_1 z_4 - q_1 z_3^2 - q_2 z_3 z_4 - z_2 z_3 - q_3 z_4^2 \end{aligned}$$

On constate que l'élément générique du pinceau  $\lambda_1 Q_1 + \lambda_2 Q_2$  est dégénéré.

PROPOSITION 5.4. *Le feuilletage  $\mathcal{F}$  de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(4)$  donné par les niveaux de  $\frac{Q_1}{Q_2}$  est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage. L'algèbre de Lie  $\mathcal{L}$  associée est résoluble de dimension trois ; si  $\tilde{X} \in \tilde{\mathcal{L}}$ , le champ  $\tilde{X}$  s'écrit*

$$\begin{aligned} &(b_1 z_0 + (b_3 - e_3 q_2 + q_2 b_1 - 2q_1 b_2) z_2 + (2p_1 b_2 - p_2 b_1 + e_3 p_2) z_3 \\ &\quad + (2p_3 b_1 - 2p_3 e_3 + p_2 b_2) z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} \\ &+ (b_1 z_1 + b_2 z_2 + b_3 z_3 + (q_2 b_2 - 2q_3 b_1 + 2q_3 e_3) z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} \\ &+ (e_3 z_2 + (b_3 - e_3 q_2 + q_2 b_1 - 2q_1 b_2) z_4) \frac{\partial}{\partial z_2} \\ &+ (e_3 z_3 + b_2 z_4) \frac{\partial}{\partial z_3} + (2e_3 - b_1) z_4 \frac{\partial}{\partial z_4} \end{aligned}$$

où  $b_1, b_2, b_3, e_3 \in \mathbf{C}$ . Ce  $\mathcal{L}$ -feuilletage ne vérifie pas la condition de **régularité** le long de  $z_4 = 0$ .

DÉMONSTRATION. L'expression des champs  $\tilde{X}$  a été obtenue via Maple. L'hyperplan  $z_4 = 0$  n'est pas invariant par le feuilletage puisque  $\frac{Q_1}{Q_2}$  n'y est pas constant. Par contre il est invariant par tous les champs  $\tilde{X}$ . On constate par un calcul élémentaire qu'ils sont dépendants le long de cet hyperplan.  $\square$

**1.5. Ubiquité de l'exemple de Gordan-Noëther.** Revenons à l'exemple de Gordan-Noëther

$$P = z_1^2 z_3 + z_1 z_2 z_4 + z_2^2 z_5$$

dans  $\mathbf{C}^5$  et considérons sa restriction à la carte  $z_1 = 1$

$$P_1 = z_3 + z_2 z_4 + z_2^2 z_5$$

On constate que les champs

$$z_2 \frac{\partial}{\partial z_3} - \frac{\partial}{\partial z_4}, \quad z_2 \frac{\partial}{\partial z_4} - \frac{\partial}{\partial z_5} \quad \text{et} \quad z_2 \frac{\partial}{\partial z_2} - z_4 \frac{\partial}{\partial z_4} - 2z_5 \frac{\partial}{\partial z_5}$$

sont tangents aux niveaux de  $P_1$ . Le feuilletage par les niveaux de  $P_1$  est donc une fois encore un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de  $\mathbf{C}^4$ , lequel s'étend bien sûr à  $\mathbf{CP}(4)$ ; il a pour intégrale première

$$\frac{z_1^2 z_3 + z_1 z_2 z_4 + z_2^2 z_5}{z_1^3}$$

qui définit un feuilletage de degré 2.

Maintenant on considère la restriction de  $P$  à la carte  $z_3 = 1$ ; on obtient le polynôme

$$P_2 = z_1^2 + z_1 z_2 z_4 + z_2^2 z_5$$

qui est annulé par les champs

$$z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} - 2 \frac{\partial}{\partial z_4}, \quad z_2 \frac{\partial}{\partial z_4} - z_1 \frac{\partial}{\partial z_5}, \quad z_2 \frac{\partial}{\partial z_2} - z_4 \frac{\partial}{\partial z_4} - 2z_5 \frac{\partial}{\partial z_5}$$

et produit encore un exemple de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(4)$  d'intégrale première

$$\frac{z_1^2 z_3 + z_1 z_2 z_4 + z_2^2 z_5}{z_3^3}$$

Ces deux exemples, tous deux de type 4.1., sont non équivalents.

## 2. Exemples de type 4.1.

### 2.1. Cas spécial. (où l'on retrouve l'ubiquité de Gordan-Noether).

Nous allons nous intéresser à un cas spécial de  $\mathcal{L}$ -feuilletage quadratique de type 4.1. sur  $\mathbf{CP}(4)$ . Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{CP}(4)$  ayant une intégrale première du type  $\frac{C}{z_0^3}$  où  $C$  est un polynôme cubique. La restriction de  $\mathcal{F}$  à la carte affine  $z_0 = 1$  définit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{C}^4$  ayant pour intégrale première  $P(z_1, z_2, z_3, z_4) = C(1, z_1, z_2, z_3, z_4)$ . Nous allons supposer que  $P$  est un polynôme homogène.

**THÉORÈME 5.5.** *Soit  $P$  un polynôme homogène minimal de degré 3 sur  $\mathbf{C}^4$  définissant un  $\mathcal{L}$ -feuilletage. Alors à conjugaison près  $P$  est de l'un des types suivants :*

1.  $z_1 z_2^2$
2.  $z_1 z_2 z_3$
3.  $z_1(z_2^2 - z_3 z_4)$
4.  $z_1^2 z_3 + z_1 z_2(a_1 z_1 + z_2 + z_3 + z_4) + z_2^2 z_4$
5.  $z_1^2 z_3 + z_1 z_2(z_3 + z_4) + z_2^2 z_4$
6.  $z_1^2 z_3 + z_1 z_2 z_4 + a_2 z_2^3$

**REMARQUES.** 1. Considérons le polynôme de **Gordan-Noether**

$$P = z_1^2 z_3 + z_1 z_2 z_5 + z_2^2 z_4$$

Si l'on restreint  $P$  à  $z_2 = 0$  on obtient à permutation près des coordonnées le premier cas 1. En restreignant à  $z_3 = z_4 = 0$  on trouve 2; la restriction de  $P$  à  $z_4 = 0$  est à conjugaison près le cas 3. En restreignant  $P$  à l'hyperplan  $a_1 z_1 + z_2 + z_3 + z_4$ , on obtient le cas 4. En le restreignant à  $z_5 = z_3 + z_4$ , on retrouve le cas 5. Enfin le cas 6. s'obtient en permutant  $z_4$  et  $z_5$  et en restreignant  $P$  à  $z_5 = a_2 z_2$ .

2. Par conjugaison on peut supposer  $a_2 \in \{0, 1\}$ .

**DÉMONSTRATION.** D'après le théorème 1.16, l'origine n'est pas une singularité isolée de  $dP$  sinon le feuilletage  $\mathcal{F}$  serait de degré 1. Il s'ensuit que  $dP$

s'annule sur un nombre fini de droites, ou sur une surface ou encore sur une hypersurface. Nous allons traiter ces différentes éventualités au cas par cas.

1. Si  $dP$  s'annule sur une hypersurface,  $P$  n'est pas réduit et s'écrit  $z_1^2 L$  où  $L$  désigne une forme linéaire. Puisque  $P$  est minimal,  $L$  est non colinéaire à  $z_1$ . Le  $\mathcal{L}$ -feuilletage  $\mathcal{F}$  décrit par le polynôme  $P$  est alors de degré 1 et  $P$  est du type  $z_1 z_2^2$ .
2. Considérons le cas où  $dP$  s'annule au moins sur une droite par exemple d'équation  $z_2 = z_3 = z_4 = 0$ . En particulier le polynôme  $P$  n'a de monôme ni en  $z_1^3$ , ni en  $z_1^2 z_i$ ; par suite il est de la forme

$$z_1 q(z_2, z_3, z_4) + r(z_2, z_3, z_4)$$

où  $q$  est une forme quadratique et  $r$  un polynôme cubique. Un champ de vecteurs  $X$  annulant  $P$  doit être tangent au lieu singulier de  $P$  et en particulier à l'axe des  $z_1$ . Par suite, il s'écrit

$$A_1(z_1, z_2, z_3, z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} + \sum_{i=2}^4 A_i(z_2, z_3, z_4) \frac{\partial}{\partial z_i}$$

Remarquons que si  $q \equiv 0$ , alors  $\mathcal{F}$  est un pull-back; ce cas a été traité dans le corollaire de l'introduction.

Si l'on écrit  $X$  sous la forme  $A_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + Y$ , on a

$$\begin{cases} A_1 q + z_1 Y(q) = 0 \\ Y(r) = 0 \end{cases}$$

Si  $q \neq 0$ , alors  $A_1$  est divisible par  $z_1$ , autrement dit

$$X = \lambda_1 z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + Y$$

Supposons que pour tout champ  $X$  annulant le polynôme  $P$  on ait  $\lambda_1 = 0$ . La dimension ponctuelle générique de tels  $X$  étant trois, le polynôme  $P$  est annulé par  $\frac{\partial}{\partial z_2}$ ,  $\frac{\partial}{\partial z_3}$  et  $\frac{\partial}{\partial z_4}$  ce qui est absurde. Ainsi on peut trouver des champs annulant  $P$  du type

$$X_1 = z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + Y_1, \quad X_2 = Y_2 \text{ et } X_3 = Y_3$$

génériquement indépendants; il en est de même pour les champs  $Y_2$  et  $Y_3$ . Les égalités

$$\begin{cases} Y_2(q) = Y_2(r) = 0 \\ Y_3(q) = Y_3(r) = 0 \end{cases}$$

impliquent que les composantes connexes des niveaux de  $q$  et  $r$  sont les mêmes.



Si la forme quadratique  $q$  est de rang 2 ou 3, alors on a  $r = 0$  et  $P$  s'écrit à conjugaison près

$$z_1(z_2^2 - z_3z_4)$$

que nous avons déjà rencontré ou

$$z_1z_2z_3$$

Dans les deux cas on obtient un  $\mathcal{L}$ -feuilletage.

Reste à considérer le cas où la forme quadratique  $q$  est de rang 1 : le polynôme  $P$  est alors de la forme

$$z_1z_2^2 + \varepsilon z_2^3 = z_2^2(z_1 + \varepsilon z_2)$$

qui est conjugué à  $z_1z_2^2$  et le feuilletage obtenu est de degré 1.

### 3. Cas où $dP$ s'annule sur une surface $S$ .

3.1. Supposons qu'une composante de  $S$  soit un plan par exemple d'équation  $z_1 = z_2 = 0$ , alors  $P$  est du type

$$z_1^2L_1 + z_1z_2L_2 + z_2^2L_3$$

où  $L_i$  désigne une forme linéaire. On a l'alternative suivante :

- le feuilletage  $\mathcal{F}$  est un pull-back (et donc encore du type  $z_1z_2^2$ )
- les formes linéaires  $z_1, z_2, L_1, L_2$  et  $L_3$  forment un système de rang 4. On se ramène alors aux deux cas suivants

$$z_1^2z_3 + z_1z_2L + z_2^2z_4$$

$$z_1^2z_3 + z_1z_2z_4 + z_2^2L$$

où  $L$  désigne une forme linéaire. Il nous faut maintenant caractériser les  $L$  qui produisent un  $\mathcal{L}$ -feuilletage. Comme le lieu singulier doit être invariant par tout champ  $X$  annulant  $P$ , un tel champ, nécessairement linéaire, est de la forme

$$\begin{aligned} & (b_1z_1 + b_2z_2) \frac{\partial}{\partial z_1} + (c_1z_1 + c_2z_2) \frac{\partial}{\partial z_2} \\ & + \left( \sum_{i=1}^4 \alpha_i z_i \right) \frac{\partial}{\partial z_3} + \left( \sum_{i=1}^4 \beta_i z_i \right) \frac{\partial}{\partial z_4} \end{aligned}$$

Posons

$$L = \sum_{i=1}^4 a_i z_i$$

3.1.1. Commençons par considérer le cas où  $P$  est de la forme

$$z_1^2 z_3 + z_1 z_2 L + z_2^2 z_4$$

L'égalité  $X(P) = 0$  se traduit par le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} 2b_1 + c_1 a_3 + \alpha_3 = 0 \\ 2a_1 b_1 + 2a_2 c_1 + a_1 c_2 + \alpha_2 + \alpha_1 a_3 + \beta_1 a_4 \\ b_1 a_2 + 2a_1 b_2 + 2a_2 c_2 + \alpha_2 a_3 + \beta_2 a_4 + \beta_1 = 0 \\ b_1 a_4 + 2c_1 + a_4 c_2 + \alpha_4 a_3 + \beta_4 a_4 = 0 \\ 2b_2 + b_1 a_3 + a_3 c_2 + \alpha_3 a_3 + \beta_3 a_4 = 0 \\ b_2 a_2 + \beta_2 = 0 \\ b_2 a_4 + 2c_2 + \beta_4 = 0 \\ b_2 a_3 + \beta_3 = 0 \\ a_1 c_1 + \alpha_1 = 0 \\ a_4 c_1 + \alpha_4 = 0 \end{array} \right.$$

C'est un système de dix équations à douze inconnues. Pour que la dimension ponctuelle des champs  $X$  annulant  $P$  soit génériquement trois, il nous faut au moins trois solutions indépendantes. Ceci impose des conditions sur les  $a_i$  qui régissent le système. En substituant on obtient que ce système a un espace de solutions de dimension au moins trois si et seulement si

$$(a_2 a_4 - 1)(2a_1 + a_1 a_4^2 - 3a_2 a_4) = (a_3 a_4 - 1) = 0$$

3.1.1.1. Lorsque  $a_2 a_4 = a_3 a_4 = 1$ , quitte à conjuguer par une application linéaire ad-hoc on se ramène à  $a_2 = a_3 = a_4 = 1$ , autrement dit

$$P = z_1^2 z_3 + z_1 z_2 (a_1 z_1 + z_2 + z_3 + z_4) + z_2^2 z_4$$

On peut alors résoudre le système précédent et l'espace vectoriel des champs annulant  $P$  est engendré par les trois champs

$$\begin{aligned} X_1 &= z_2 \frac{\partial}{\partial z_3} - z_1 \frac{\partial}{\partial z_4} \\ X_2 &= (z_1 + z_2) \frac{\partial}{\partial z_1} - 2z_3 \frac{\partial}{\partial z_3} - (2a_1 z_1 + z_2 + z_3 + z_4) \frac{\partial}{\partial z_4} \\ X_3 &= (z_1 + z_2) \frac{\partial}{\partial z_2} - (a_1 z_1 + z_3 + z_4) \frac{\partial}{\partial z_3} - 2(z_1 + z_4) \frac{\partial}{\partial z_4} \end{aligned}$$

On constate que ces trois champs engendrent une algèbre de dimension ponctuelle trois.

3.1.1.2. Passons au cas où  $a_3a_4 = 1$  et  $2a_1 + a_1a_4^2 - 3a_2a_4 = 0$ . Comme  $a_3$  et  $a_4$  sont non nuls, on se ramène par une application linéaire de type

$$(z_1, z_2, z_3, z_4) \mapsto (\rho_1 z_1, \rho_2 z_2, \rho_3 z_3, \rho_4 z_4)$$

ad-hoc aux deux cas suivants :

$$P_1 = z_1^2 z_3 + z_1 z_2 (z_3 + z_4) + z_2^2 z_4$$

et

$$P_2 = z_1^2 z_3 + z_1 z_2 (z_1 + z_2 + z_3 + z_4) + z_2^2 z_4$$

Dans le premier cas, les champs suivants annulent  $P_1$  :

$$\begin{aligned} & z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_2} - 2z_3 \frac{\partial}{\partial z_3} - 2z_4 \frac{\partial}{\partial z_4} \\ & z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} - z_2 \frac{\partial}{\partial z_2} + (z_4 - z_3) \frac{\partial}{\partial z_4} \\ & z_2 \frac{\partial}{\partial z_3} - z_1 \frac{\partial}{\partial z_4} \end{aligned}$$

Ainsi  $P_1$  définit bien un  $\mathcal{L}$ -feuilletage.

Le second cas est un cas particulier du cas 3.1.1.1. avec  $a_1 = 1$ .

3.1.2. Considérons le cas où  $P$  est de la forme

$$z_1^2 z_3 + z_1 z_2 z_4 + z_2^2 (a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3 + a_4 z_4)$$

Notons que si  $a_4 \neq 0$ , en posant  $Z_4 = a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3 + a_4 z_4$  on se ramène au cas précédent. Nous supposons donc que  $a_4 = 0$ . Quitte à changer  $z_4$  en  $z_4 - a_1 z_2$  on a  $a_1 = 0$ ; autrement dit  $P$  s'écrit

$$z_1^2 z_3 + z_1 z_2 z_4 + z_2^2 (a_2 z_2 + a_3 z_3)$$

On procède comme précédemment ; l'égalité  $X(P) = 0$  conduit au système

$$\left\{ \begin{array}{l} b_1 + \beta_4 + c_2 = 0 \\ b_2 + \alpha_4 a_3 = 0 \\ c_1 + \alpha_4 = 0 \\ 2b_1 + \alpha_3 = 0 \\ 2b_2 + 2a_3 c_1 + \beta_3 = 0 \\ a_3(2c_2 + \alpha_3) = 0 \\ 3a_2 c_1 + \alpha_1 a_3 + \beta_2 = 0 \\ 3a_2 c_2 + \alpha_2 a_3 = 0 \\ \alpha_1 = 0 \\ \alpha_2 + \beta_1 = 0 \end{array} \right.$$

3.1.2.1. Supposons que  $a_3 = 0$ , i.e. que le polynôme  $P$  s'écrive

$$P = z_1^2 z_3 + z_1 z_2 z_4 + a_2 z_2^3$$

On a l'alternative suivante :

-  $a_2 \neq 0$ , le polynôme  $P$  est alors annulé par les champs

$$\begin{aligned} & z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} - 2z_3 \frac{\partial}{\partial z_3} - z_4 \frac{\partial}{\partial z_4} \\ & z_1 \frac{\partial}{\partial z_2} - z_4 \frac{\partial}{\partial z_3} - 3a_2 z_2 \frac{\partial}{\partial z_4} \\ & z_2 \frac{\partial}{\partial z_3} - z_1 \frac{\partial}{\partial z_4} \end{aligned}$$

Il définit donc bien un  $\mathcal{L}$ -feuilletage.

-  $a_2 = 0$ , le polynôme  $P$  décrit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage dont l'algèbre associée, de dimension 4, est engendrée par les champs

$$\begin{aligned} & z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} - 2z_3 \frac{\partial}{\partial z_3} - z_4 \frac{\partial}{\partial z_4} \\ & z_1 \frac{\partial}{\partial z_2} - z_4 \frac{\partial}{\partial z_3} \\ & z_2 \frac{\partial}{\partial z_2} - z_4 \frac{\partial}{\partial z_4} \\ & z_2 \frac{\partial}{\partial z_3} - z_1 \frac{\partial}{\partial z_4} \end{aligned}$$

On constate que la dimension de l'algèbre passe de trois à quatre lorsque  $a_2$  s'annule.

3.1.2.2. Supposons maintenant que  $a_3 \neq 0$ . A conjugaison près par des applications du type

$$(z_1, z_2, z_3, z_4) \mapsto (\rho_1 z_1, \rho_2 z_2, \rho_3 z_3, \rho_4 z_4)$$

on se ramène à l'étude des deux cas suivants

$$\begin{aligned} & z_1^2 z_3 + z_1 z_2 z_4 + z_2^2 z_3 \\ & z_1^2 z_3 + z_1 z_2 z_4 + z_2^2 (z_2 + z_3) \end{aligned}$$

Les champs qui annulent ces deux polynômes forment un espace de dimension 2 donc les feuilletages décrits par ces polynômes ne sont pas des  $\mathcal{L}$ -feuilletages.

3.2. Plaçons nous dans l'éventualité où la surface  $S$  contient une composante non plane. On peut alors supposer que trois axes de coordonnées sont dans  $S$ , par exemple les axes  $z_1, z_2$  et  $z_3$ . Par un argument déjà rencontré, le polynôme  $P$  est affine en  $z_1, z_2, z_3$  et quadratique en  $z_4$ ; on constate que  $P$  est du type

$$\varepsilon z_1 z_2 z_3 + z_4^2 (a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3)$$

On remarque que  $\varepsilon \neq 0$  sinon le feuilletage décrit par  $P$  est de degré 1. Déterminons les valeurs des  $a_i$  pour lesquelles ces polynômes ont une surface singulière.

3.2.1. Si  $a_1 a_2 a_3 \neq 0$ , on se ramène par homothétie à

$$P = z_1 z_2 z_3 + z_4^2 (z_1 + z_2 + z_3)$$

et un calcul élémentaire montre que  $\text{codim } \text{Sing } P = 3$ .

3.2.2. Si deux des  $a_i$  sont non nuls, on se ramène à

$$P = z_1 z_2 z_3 + z_4^2 (z_1 + z_2)$$

et comme précédemment le lieu singulier de  $P$  est de codimension 3.

3.2.3. Reste donc le cas où un seul des  $a_i$  est non nul, alors  $P$  est de la forme :

$$z_1 (z_2 z_3 + z_4^2)$$

cas déjà rencontré.

□

**2.2. Exemples de  $\mathcal{L}$ -feuilletages quadratiques satisfaisant  $\dim \mathcal{L} = 3$ .** Lors de l'étude des  $\mathcal{L}$ -feuilletages de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$  correspondant aux algèbres  $\mathcal{L}_\alpha$ , nous avons rencontré une dégénérescence qui produit un feuilletage de degré 2 de type 4.1 ; l'algèbre  $\mathcal{L}$  est ici de dimension trois (cf. chapitre 6). Voici cet exemple :

L'algèbre  $\mathcal{L}$  est engendrée par les champs

$$\begin{aligned} X &= \left( -2z_0 + (\xi_5 c - h)z_2 + \frac{c\xi_{13} + \delta + 2\xi_5 e}{2} z_4 \right) \frac{\partial}{\partial z_0} \\ &\quad + (\xi_5 z_0 - 3z_1 + \xi_7 z_2 + \xi_8 z_3 + (h\xi_{13} + 2i - \xi_5 \delta)z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} \\ &\quad + (-z_2 + \xi_{13} z_3) \frac{\partial}{\partial z_2} + (\xi_5 z_3 - z_4) \frac{\partial}{\partial z_4}, \\ Z &= (cz_2 + \delta z_3 + ez_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + (z_0 + hz_2 + iz_3) \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_4}, \end{aligned}$$

$$Y = z_3 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_1}$$

L'algèbre engendrée par  $X, Y$  et  $Z$  est résoluble et de type  $\mathcal{L}_\alpha$  (avec  $\alpha = 2$ ), c'est-à-dire possède une présentation de la forme

$$\{[\tilde{X}, \tilde{Y}] = \tilde{Y}, [\tilde{X}, \tilde{Z}] = \alpha \tilde{Z}, [\tilde{Y}, \tilde{Z}] = 0\}, \quad \alpha \neq 0$$

On montre que le feuilletage associé à cette algèbre admet pour intégrale première

$$\frac{3(z_2 - \xi_{13}z_3)^3}{z_0z_3z_4 - z_1z_3^2 - \frac{e}{3}z_4^3 - \frac{cz_2 + \delta z_3}{2}z_4^2 + (hz_2 + iz_3)z_3z_4 + \kappa z_3^3 - 3\xi_5hz_2z_3^2}$$

où

$$\kappa = -\xi_{13}(\xi_7 - \xi_5h) - 2(\xi_5i - \xi_8)$$

c'est-à-dire à conjugaison près

$$\frac{z_2^3}{z_0z_3z_4 + z_1z_3^2 + z_4^2(az_4 + bz_2)}$$

avec  $a, b \in \{0, 1\}$ .

REMARQUES. 1. En se restreignant à la carte affine  $z_2 = 1$ , on constate que le polynôme

$$P = z_0z_3z_4 + z_1z_3^2 + az_4^3 + bz_4^2$$

définit un  $\mathcal{L}$ -feuilletage sur  $\mathbf{C}^4$ .

2. Le dénominateur  $z_0z_3z_4 + z_1z_3^2 + z_4^2(az_4 + bz_2)$  est encore lorsque  $b$  est non nul de type Gordan-Noether. Pour  $b = 0$ , le feuilletage est un pull-back.

## CHAPITRE 6

### $\mathcal{L}$ -feuilletages de degré trois sur $\mathbf{CP}(4)$ .

Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$ , la proposition assure que  $\dim \mathcal{L} = 3$ . Ainsi la classification des  $\mathcal{L}$ -feuilletages de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$  repose sur celle des algèbres de Lie de dimension 3 ([7]). Pour classifier les algèbres de Lie  $\mathcal{L}$  de dimension 3, on considère l'application bilinéaire

$$[\cdot, \cdot] : \mathcal{L} \times \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{L}$$

et plus particulièrement son rang.

Si  $\dim[\mathcal{L}, \mathcal{L}] = 0$ , l'algèbre  $\mathcal{L}$  est abélienne.

Si  $\dim[\mathcal{L}, \mathcal{L}] = 1$ , l'algèbre  $\mathcal{L}$  est décrite par les présentations

$$\{[X, Y] = [X, Z] = 0, [Y, Z] = Y\}$$

ou

$$\{[X, Y] = [X, Z] = 0, [Y, Z] = X\}$$

Si  $\dim[\mathcal{L}, \mathcal{L}] = 2$ , l'algèbre  $\mathcal{L}$  est du type

$$\{[X, Y] = Y, [X, Z] = \alpha Z, [Y, Z] = 0\}$$

avec  $\alpha \in \mathbf{C}^*$  ou bien

$$\{[X, Y] = Y, [X, Z] = Y + Z, [Y, Z] = 0\}$$

.

Enfin si  $\dim[\mathcal{L}, \mathcal{L}] = 3$ , alors  $\mathcal{L}$  est isomorphe à  $sl(2, \mathbf{C})$ .

Nous allons étudier au cas par cas les  $\mathcal{L}$ -feuilletages associés.

#### 1. L'algèbre $\mathcal{L}$ est isomorphe à $sl(2, \mathbf{C})$ .

Par simple connexité de  $SL(2, \mathbf{C})$ , la représentation de  $sl(2, \mathbf{C})$  dans  $\mathcal{M}(5, \mathbf{C})$  donnée par  $\mathcal{L}'$  assure l'existence d'une action linéaire de  $SL(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{C}^5$ . On est donc ramené à classifier les actions linéaires de  $SL(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{C}^5$  que nous allons décrire.

Commençons donc par supposer que l'action est irréductible; c'est alors à conjugaison près l'action naturelle de  $SL(2, \mathbf{C})$  sur les polynômes homogènes de degré quatre en deux variables. Cette action descend à l'espace projectif pour donner un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 dont les feuilles sont les niveaux génériques de la fonction  $j$ ; nous l'avons décrite au chapitre 2. A conjugaison

près ce  $\mathcal{L}$ -feuilletage est unique puisqu'il y a une unique action irréductible de  $\mathrm{SL}(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{C}^5$ .

Supposons maintenant que l'action linéaire de  $\mathrm{SL}(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{C}^5$  soit réductible ; elle se décompose en actions irréductibles avec les configurations suivantes des différents facteurs :

$$\mathbf{C} \oplus \mathbf{C}^4, \mathbf{C}^2 \oplus \mathbf{C}^3, \mathbf{C} \oplus \mathbf{C} \oplus \mathbf{C}^3, \mathbf{C} \oplus \mathbf{C}^2 \oplus \mathbf{C}^2, \\ \mathbf{C} \oplus \mathbf{C} \oplus \mathbf{C} \oplus \mathbf{C}^2, \text{ et } \mathbf{C} \oplus \mathbf{C} \oplus \mathbf{C} \oplus \mathbf{C} \oplus \mathbf{C}.$$

On peut exclure les deux dernières configurations : l'action sur chaque facteur  $\mathbf{C}$  étant triviale, elles ne donneront pas d'orbites de dimension quatre. Examinons les autres possibilités au cas par cas :

(i) action de  $\mathrm{SL}(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{C} \oplus \mathbf{C}^4$ .

Sur le facteur  $\mathbf{C}$  l'action est triviale et sur  $\mathbf{C}^4$  c'est l'action naturelle de  $\mathrm{SL}(2, \mathbf{C})$  sur  $V_4$  (cf chapitre 2) à conjugaison près. Elle admet pour invariants  $z_1$  et  $\Delta(z_2, \dots, z_5)$  où

$$\Delta(z_2, z_3, z_4, z_5) = z_3^2 z_4^2 - 4z_2 z_4^3 - 4z_3^3 z_5 + 18z_2 z_3 z_4 z_5$$

Par suite  $\mathcal{F}$  possède l'intégrale première

$$\frac{\Delta(z_2, \dots, z_5)}{z_1^4}$$

A conjugaison près, le  $\mathcal{L}$ -feuilletage  $\mathcal{F}$  est unique. Il a déjà été étudié dans la liste d'exemples (chapitre 2) mais présenté de manière différente.

(ii) action de  $\mathrm{SL}(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{C}^2 \oplus \mathbf{C}^3$ .

Elle est conjuguée à l'action de  $\mathrm{SL}(2, \mathbf{C})$  sur  $V_2 \oplus V_3$ . On note les éléments de  $V_2 \oplus V_3$  sous la forme

$$(z_1 x + z_2 y, z_3 x^2 + z_4 xy + z_5 y^2)$$

A chacun de ces éléments on associe

$$Q_1 = (z_1 x + z_2 y)^2 = z_1^2 x^2 + 2z_1 z_2 xy + z_2^2 y^2,$$

$$Q_2 = z_3 x^2 + z_4 xy + z_5 y^2$$

et  $\tilde{Q}_i$  la matrice de la forme quadratique  $Q_i$ . Soit  $P \in \mathrm{SL}(2, \mathbf{C})$  ; on a

$$\det({}^t P(\tilde{Q}_1 - \kappa \tilde{Q}_2)P) = \det(\tilde{Q}_1 - \kappa \tilde{Q}_2)$$

autrement dit

$$\det(\tilde{Q}_1 - \kappa \tilde{Q}_2) = \kappa^2 \left( z_3 z_5 - \frac{z_4^2}{4} \right) - \kappa(z_3 z_2^2 + z_5 z_1^2 - z_1 z_2 z_4)$$

est un invariant de l'action de  $\mathrm{SL}(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{C}^2 \oplus \mathbf{C}^3$ . Ainsi les niveaux génériques de

$$\left( z_3 z_5 - \frac{z_4^2}{4}, z_3 z_2^2 + z_5 z_1^2 - z_1 z_2 z_4 \right)$$



définissent le feuilletage de codimension 2 associé à  $\mathcal{L}'$  et

$$\frac{(z_3 z_2^2 + z_5 z_1^2 - z_1 z_2 z_4)^2}{\left(z_3 z_5 - \frac{z_4^2}{4}\right)^3}$$

est une intégrale première du  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 associé à  $\mathcal{L}$ .

REMARQUE. Le numérateur de cette intégrale première est le polynôme de Gordan-Noether ; on retrouve le feuilletage exceptionnel en coupant par un  $\mathbf{CP}(3)$  ad hoc. Ce  $\mathbf{CP}(3)$  est non générique puisqu'il y a une chute de degré.

(iii) action de  $SL(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{C} \oplus \mathbf{C}^2 \oplus \mathbf{C}^2$ .

On écrit l'élément  $g \in SL(2, \mathbf{C})$  sous la forme

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$$

Comme l'action naturelle de  $SL(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{C}^2$  correspond à l'action sur les formes linéaires, on peut voir l'action sur  $\mathbf{C}^2 \oplus \mathbf{C}^2$  à conjugaison près comme suit

$$g.(z_2 x + z_3 y, z_4 x + z_5 y) \simeq \begin{pmatrix} z_2 & z_3 \\ z_4 & z_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}^{-1}$$

On constate ainsi que

$$\det \begin{pmatrix} z_2 & z_3 \\ z_4 & z_5 \end{pmatrix} = z_2 z_5 - z_3 z_4$$

est un invariant et que les niveaux génériques de

$$(z_1, z_2 z_5 - z_3 z_4)$$

sont les feuilles du feuilletage de codimension 2 associé à  $\mathcal{L}'$  avec les notations habituelles. Ainsi

$$\frac{z_2 z_5 - z_3 z_4}{z_1^2}$$

est une intégrale première du  $\mathcal{L}$ -feuilletage associé à  $\mathcal{L}$  qui est donc de degré 1 (car défini dans la carte affine  $z_1 = 1$  par une forme quadratique) ; cette action n'induit donc pas un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$ .

(iv) action de  $SL(2, \mathbf{C})$  sur  $\mathbf{C} \oplus \mathbf{C} \oplus \mathbf{C}^3$ .

Cette action est triviale sur chaque facteur  $\mathbf{C}$  et sur le facteur  $\mathbf{C}^3$  c'est l'action naturelle sur  $V_3$ . Ainsi le feuilletage associé à  $\mathcal{L}'$  est donné par les

niveaux de  $(z_1, z_2)$  et une intégrale première du  $\mathcal{L}$ -feuilletage associé à  $\mathcal{L}$  est  $\frac{z_1}{z_2}$ . Par suite ce feuilletage est de degré 0.

Finalement seules les deux premières actions conduisent à un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$  :

**THÉORÈME 6.1.** *Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$ . Si  $\mathcal{L}$  est isomorphe à  $sl(2, \mathbf{C})$ , alors le feuilletage  $\mathcal{F}$  admet à conjugaison près l'une des intégrales premières suivantes :*

$$\frac{z_3^2 z_4^2 - 4z_2 z_4^3 - 4z_3^3 z_5 + 18z_2 z_3 z_4 z_5}{z_1^4}$$

$$\frac{(z_3 z_2^2 + z_5 z_1^2 - z_1 z_2 z_4)^2}{\left(z_3 z_5 - \frac{z_4^2}{4}\right)^3}$$

## 2. L'algèbre $\mathcal{L}$ est abélienne

En classifiant les triplets de matrices  $(5, 5)$  qui commutent on se ramène à étudier les sept cas qui suivent :

(i)  $\tilde{\mathcal{L}}$  est diagonale,

ou bien  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les champs du type suivant

$$(ii) \quad \kappa z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_2}, \quad \xi z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_4} \text{ et } R.$$

$$(iii) \quad \kappa z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_4}, \quad z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} \text{ et } R$$

$$(iv) \quad \kappa z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_2}, \quad (z_0 + \xi z_1) \frac{\partial}{\partial z_0} + z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} \text{ et } R.$$

$$(v) \quad z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_2}, \quad \kappa z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad \xi z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} \text{ et } R.$$

$$(vi) \quad \kappa z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + (z_2 + \xi z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad \beta z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + (z_3 + \delta z_4) \frac{\partial}{\partial z_2}, \\ z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_1} \text{ et } R.$$

$$(vii) \quad (z_1 + \kappa z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad (z_2 + \xi z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_3}, \\ (z_3 + \beta z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_1} \text{ et } R.$$

REMARQUE. On a éliminé les algèbres qui donnent des feuilletages de degré strictement inférieur à 3.

Examinons ces possibilités au cas par cas :

(i) Commençons par traiter le cas où  $\tilde{\mathcal{L}}$  est diagonale ; une base de  $\tilde{\mathcal{L}}$  est

$$X = \sum_{k=0}^4 \kappa_k z_k \frac{\partial}{\partial z_k}, \quad Y = \sum_{k=0}^4 \mu_k z_k \frac{\partial}{\partial z_k}, \quad Z = \sum_{k=0}^4 \nu_k z_k \frac{\partial}{\partial z_k} \text{ et } R$$

Le feuilletage  $\mathcal{F}$  est décrit par

$$z_0 z_1 z_2 z_3 z_4 \sum_{k=0}^4 \xi_k \frac{dz_k}{z_k}$$

$$\text{avec } \sum_{k=0}^4 \kappa_k \xi_k = \sum_{k=0}^4 \mu_k \xi_k = \sum_{k=0}^4 \nu_k \xi_k = \sum_{k=0}^4 \xi_k = 0.$$

(ii) Cas où  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les champs

$$\kappa z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_2}, \quad \xi z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_4} \text{ et } R.$$

La 1-forme annulée par ces quatre champs s'écrit à multiplication près dans la carte affine  $z_1 = 1$

$$dz_0 - \kappa \frac{dz_2}{z_2} - \xi \frac{dz_3}{z_3} - \frac{dz_4}{z_4}$$

Le  $\mathcal{L}$ -feuilletage décrit par cette 1-forme a pour intégrale première

$$\frac{z_1^{\kappa+\xi+1}}{z_2^\kappa z_3^\xi z_4} \exp\left(\frac{z_0}{z_1}\right)$$

(iii) Cas où  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les champs

$$\kappa z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_4}, \quad z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} \text{ et } R.$$

La 1-forme annulée par ces champs s'écrit à multiplication près dans la carte affine  $z_1 = 1$

$$-dz_0 + d\left(\frac{z_2}{z_3}\right) + \kappa \frac{dz_3}{z_3} + \frac{dz_4}{z_4}$$

Le feuilletage associé à  $\mathcal{L}$  admet donc pour intégrale première

$$\frac{z_3^\kappa z_4}{z_1^{1+\kappa}} \exp\left(\frac{z_1 z_2 - z_0 z_3}{z_1 z_3}\right)$$

(iv) Cas où  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les champs

$$\kappa z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_2}, \quad (z_0 + \xi z_1) \frac{\partial}{\partial z_0} + z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} \text{ et } R.$$

La 1-forme annulée par ces quatre champs s'écrit à multiplication près dans la carte affine  $z_4 = 1$

$$d\left(\frac{z_0}{z_1}\right) - \xi \frac{dz_1}{z_1} + d\left(-z_2 + \frac{z_3^2}{2} - \kappa z_3\right)$$

Le  $\mathcal{L}$ -feuilletage décrit par cette 1-forme a pour intégrale première

$$\frac{z_0 z_4^2 - z_1 z_2 z_4 - \kappa z_1 z_3 z_4 + \frac{z_1 z_3^2}{2}}{z_1 z_4^2}$$

si  $\xi = 0$ ,

$$\left(\frac{z_1}{z_4}\right)^\xi \exp\left(\frac{z_0 z_4^2 - z_1 z_2 z_4 - \kappa z_1 z_3 z_4 + \frac{z_1 z_3^2}{2}}{z_1 z_4^2}\right)$$

sinon. A conjugaison près on obtient :

$$\frac{z_0 z_4^2 - z_1 z_2 z_4 + z_1 z_3^2}{z_1 z_4^2}$$

si  $\xi = 0$ ,

$$\left(\frac{z_1}{z_4}\right)^\xi \exp\left(\frac{z_0 z_4^2 - z_1 z_2 z_4 + z_1 z_3^2}{z_1 z_4^2}\right)$$

sinon.

(v) Cas où l'algèbre  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les champs

$$z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_2}, \quad \kappa z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad \xi z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} \text{ et } R.$$

La 1-forme  $\omega$  annulant ces quatre champs s'écrit à multiplication près dans la carte affine  $z_4 = 1$

$$-\frac{dz_0}{z_0} + \xi \frac{dz_1}{z_1} - \xi dz_2 + \xi(z_3 - \kappa)dz_3$$

Le feuilletage associé à l'algèbre  $\mathcal{L}$  admet pour intégrale première

$$\frac{z_1^\xi z_4^{1-\xi}}{z_0} \exp \left( \frac{\xi(z_3^2 - 2\kappa z_3 z_4 - 2z_2 z_4)}{2z_4^2} \right)$$

soit à conjugaison près

$$\frac{z_1^\xi z_4^{1-\xi}}{z_0} \exp \left( \frac{z_3^2 - z_2 z_4}{z_4^2} \right)$$

(vi) Cas où l'algèbre  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les champs

$$\kappa z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad \beta z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + (z_3 + \delta z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_2},$$

$$z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_1} \text{ et } R.$$

La 1-forme  $\omega$  annulée par ces quatre champs s'écrit à multiplication près dans la carte affine  $z_4 = 1$

$$\frac{dz_0}{z_0} + d \left( -z_1 + z_2 z_3 + (\delta - \beta) z_2 - \kappa z_3 + \frac{\beta - \delta}{2} z_3^2 - \frac{z_3^3}{3} \right)$$

Le feuilletage associé admet pour intégrale première

$$\frac{z_0}{z_4} \exp \left( \frac{-z_1 z_4^2 + z_2 z_3 z_4 + (\delta - \beta) z_2 z_4^2 - \kappa z_3 z_4^2 - \frac{z_3^3}{3} + \frac{\beta - \delta}{2} z_3^2 z_4}{z_4^3} \right)$$

que l'on peut conjuguer à

$$\frac{z_0}{z_4} \exp \left( \frac{z_1 z_4^2 + z_2 z_3 z_4 + z_3^3}{z_4^3} \right)$$

(vii) Cas où  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les champs

$$(z_1 + \kappa z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad (z_2 + \xi z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_2},$$

$$(z_3 + \beta z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_1} \text{ et } R.$$

La 1-forme  $\omega$  qui annule ces champs s'écrit à multiplication près dans la carte affine  $z_4 = 1$

$$d \left( z_0 - z_1 z_3 - \beta z_1 - \xi z_2 + \beta z_2 z_3 - \frac{z_2^2}{2} + z_2 z_3^2 - \kappa z_3 - \frac{z_3^4}{4} - \frac{\beta}{3} z_3^3 + \frac{\xi}{2} z_3^2 \right)$$

Le feuilletage décrit par cette 1-forme admet pour intégrale première

$$\frac{(z_0 - \beta z_1 - \xi z_2 - \kappa z_3) z_4^3 + (\frac{\xi}{2} z_3 - z_1 + \beta z_2) z_3 z_4^2 - \frac{z_2^2 z_4^2}{2} - \frac{z_3^4}{4} + (z_2 - \frac{\beta}{3} z_3) z_3^2 z_4}{z_4^4}$$

que l'on peut conjuguer à

$$\frac{z_0 z_4^3 + z_1 z_3 z_4^2 - \frac{z_2^2 z_4^2}{2} - \frac{z_3^4}{4} + z_2 z_3^2 z_4}{z_4^4}$$

Le théorème suivant résume l'analyse précédente; elle a été faite directement sans utiliser Maple.

**THÉORÈME 6.2.** *Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$ . Si  $\mathcal{L}$  est abélienne, alors le feuilletage  $\mathcal{F}$  admet à conjugaison près l'une des intégrales premières suivantes :*

$$z_0^{\kappa_0} z_1^{\kappa_1} z_2^{\kappa_2} z_3^{\kappa_3} z_4^{\kappa_4} \sum_{j=0}^4 \kappa_j = 0$$

$$\frac{z_1^{\kappa+\xi+1}}{z_2^\kappa z_3^\xi z_4} \exp \left( \frac{z_0}{z_1} \right)$$

$$\frac{z_3^\kappa z_4}{z_1^{1+\kappa}} \exp \left( \frac{z_1 z_2 - z_0 z_3}{z_1 z_3} \right)$$

$$\frac{z_0 z_4^2 - z_1 z_2 z_4 + z_1 z_3^2}{z_1 z_4^2}$$

$$\left( \frac{z_1}{z_4} \right)^\xi \exp \left( \frac{z_0 z_4^2 - z_1 z_2 z_4 + z_1 z_3^2}{z_1 z_4^2} \right)$$

$$\frac{z_1^\xi z_4^{1-\xi}}{z_0} \exp\left(\frac{z_3^2 - z_2 z_4}{z_4^2}\right)$$

$$\frac{z_0}{z_4} \exp\left(\frac{z_1 z_4^2 + z_2 z_3 z_4 - z_3^3}{z_4^3}\right)$$

$$\frac{z_0 z_4^3 + z_1 z_3 z_4^2 - \frac{z_2^2 z_4^2}{2} - \frac{z_3^4}{4} + z_2 z_3^2 z_4}{z_4^4}$$

Les  $\kappa_i$ ,  $\kappa$  et  $\xi$  sont des nombres complexes.

### 3. L'algèbre $\mathcal{L} = \mathcal{L}_\alpha$ a pour présentation $\{[X, Y] = Y, [X, Z] = \alpha Z, [Y, Z] = 0\}, \alpha \neq 0$ .

On remarque que si l'on change  $X$  en  $\frac{X}{\alpha}$  on a

$$\left[\frac{X}{\alpha}, Y\right] = \frac{Y}{\alpha}, \quad [Y, Z] = 0, \quad \left[\frac{X}{\alpha}, Z\right] = Z$$

On obtient avec  $X' = \frac{X}{\alpha}$ ,  $Y' = Z$  et  $Z' = Y$

$$[X', Y'] = Y', \quad [Y', Z'] = 0, \quad [X', Z'] = \frac{Z'}{\alpha}$$

Par suite l'algèbre  $\mathcal{L}$  est indifféremment déterminée par  $\alpha$  ou  $\frac{1}{\alpha}$  que l'on note  $\tilde{\alpha}$  (i.e. on note  $\tilde{\alpha} = \tilde{2}$  pour  $\alpha = 2$  ou  $\alpha = \frac{1}{2}$ ).

L'algèbre  $\mathbf{C}Y \oplus \mathbf{C}Z$  est sous-algèbre abélienne de  $\mathcal{L}$  qui est résoluble. La présentation entraîne que  $Y$  et  $Z$  sont nilpotents; on peut donc choisir une base dans laquelle  $Y$  s'écrit

$$N_{2,1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad N_{2,2} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$N_{3,1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad N_{3,2} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$N_4 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

suivant son ordre de nilpotence et son rang (on rappelle que si  $Y$  est de rang 1, le degré du feuilletage chute et en fait le feuilletage est un pull-back); on cherche alors la forme de la matrice  $Z$  : soit  $\mathcal{C}(N_i)$  le commutateur de  $N_i$

$$\mathcal{C}(N_{i,j}) = \{M \in \mathcal{M}(5, \mathbf{C}), MN_{i,j} - N_{i,j}M = 0\}$$

Un calcul fastidieux mais sans difficulté donne la description des algèbres de Lie  $\mathcal{C}(N_{i,j})$  :

$$\mathcal{C}(N_{2,1}) = \left\{ \begin{pmatrix} a & b & c & \delta & e \\ f & g & h & i & j \\ 0 & 0 & k & \ell & m \\ 0 & 0 & 0 & a & b \\ 0 & 0 & 0 & f & g \end{pmatrix} \right\}$$

$$\mathcal{C}(N_{2,2}) = \left\{ \begin{pmatrix} a & b & c & \delta & e \\ 0 & a & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f & g & h \\ 0 & 0 & i & j & k \end{pmatrix} \right\}$$

$$\mathcal{C}(N_{3,1}) = \left\{ \begin{pmatrix} a & c & e & g & i \\ 0 & b & \delta & f & h \\ 0 & 0 & a & c & e \\ 0 & 0 & 0 & b & \delta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a \end{pmatrix} \right\}$$

$$\mathcal{C}(N_{3,2}) = \left\{ \begin{pmatrix} a & b & c & \delta & e \\ 0 & a & b & c & 0 \\ 0 & 0 & a & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f & g \end{pmatrix} \right\}$$

$$\mathcal{C}(N_4) = \left\{ \begin{pmatrix} a & b & c & \delta & e \\ 0 & a & b & c & \delta \\ 0 & 0 & a & b & c \\ 0 & 0 & 0 & a & b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a \end{pmatrix} \right\}$$



Comme  $Z$  est nilpotente,  $Z$  appartient suivant l'ordre de nilpotence et le rang de  $Y$  à l'un des espaces suivants

$$\mathcal{C}'(N_{2,1}) = \left\{ \begin{pmatrix} a & b & c & \delta & e \\ f & -a & h & i & j \\ 0 & 0 & 0 & \ell & m \\ 0 & 0 & 0 & a & b \\ 0 & 0 & 0 & f & -a \end{pmatrix}, a^2 + bf = 0 \right\}$$

$$\mathcal{C}'(N_{2,2}) = \left\{ \begin{pmatrix} 0 & b & c & \delta & e \\ 0 & 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f & g & h \\ 0 & 0 & i & j & -g \end{pmatrix}, g^2 + jh = 0 \right\}$$

$$\mathcal{C}'(N_{3,1}) = \left\{ \begin{pmatrix} 0 & c & e & g & i \\ 0 & 0 & \delta & f & h \\ 0 & 0 & 0 & c & e \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \delta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \right\}$$

$$\mathcal{C}'(N_{3,2}) = \left\{ \begin{pmatrix} 0 & b & c & \delta & e \\ 0 & 0 & b & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f & 0 \end{pmatrix} \right\}$$

$$\mathcal{C}'(N_4) = \left\{ \begin{pmatrix} 0 & b & c & \delta & e \\ 0 & 0 & b & c & \delta \\ 0 & 0 & 0 & b & c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \right\}$$

Soit  $E \in \mathcal{M}(n, \mathbf{C})$  un sous-espace vectoriel de  $\mathcal{M}(n, \mathbf{C})$ ; on note  $r(E) \in \mathbb{N}$  le rang générique des éléments de  $E$  :

$$r(E) = \max\{rgM, M \in E\}$$

et  $E(M, N_{i,j})$  l'espace vectoriel engendré par  $M$  et  $N_{i,j}$ . Soit  $M \in \mathcal{C}'(N_{i,j})$  tel que  $\dim E(M, N_{i,j}) = 2$ . On introduit la sous-variété algébrique

$$F_i = \bigcup_j \{M \in \mathcal{C}'(N_{i,j}), r(E(M, N_{i,j})) = i\}$$

les ensembles

$$G_{i,j} = \{M \in \mathcal{C}'(N_{i,j}), r(E(M, N_{i,j})) \leq i\}$$

et la propriété  $\mathcal{P}$  :

$$\mathcal{P}(a, b, c, \delta, e, f, g, i, j, k, \ell) \Leftrightarrow a = b = c = f = g = 0 \text{ ou } \begin{cases} ak = -f\ell \\ \delta\ell k = -\ell^2 i + \ell jk + ek^2 \\ ck = -g\ell \\ bk^2 = -f\ell^2 \end{cases}$$

Le lemme suivant donne la description des  $F_i$  ; sa preuve utilise uniquement des arguments standards de mineurs.

LEMME 6.3. *On a*

$$\begin{aligned} G_{2,1} &= \left\{ \begin{pmatrix} a & b & c & \delta & e \\ f & -a & h & i & j \\ 0 & 0 & 0 & \ell & m \\ 0 & 0 & 0 & a & b \\ 0 & 0 & 0 & f & -a \end{pmatrix}, \mathcal{P}(a, b, c, \delta, e, f, h, i, j, \ell, m) \right\} \\ G_{2,2} &= \left\{ \begin{pmatrix} 0 & b & c & \delta & e \\ 0 & 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i & 0 & 0 \end{pmatrix} \right\} \\ G_{3,1} &= \left\{ \begin{pmatrix} 0 & c & e & g & i \\ 0 & 0 & \delta & f & h \\ 0 & 0 & 0 & c & e \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \delta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, c\delta = 0 \right\} \\ G_{3,2} &= \left\{ \begin{pmatrix} 0 & 0 & c & \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \right\} \\ G_4 &= \left\{ \begin{pmatrix} 0 & b & c & \delta & e \\ 0 & 0 & b & c & \delta \\ 0 & 0 & 0 & b & c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \right\} \end{aligned}$$

REMARQUE. Si l'on note  $G_i = \bigcup_j G_{i,j}$ , on obtient à partir de la description des  $G_{ij}$  celle des  $F_i$  :

$$F_2 = G_2, F_3 = G_3 \setminus G_2, F_4 = G_4 \setminus (G_2 \cup G_3)$$

DÉMONSTRATION. Commençons par décrire l'ensemble  $G_{2,1}$  ; l'annulation pour tout réel  $t$  des mineurs  $(3, 3)$  de la matrice

$$\begin{pmatrix} a & b & c & \delta + t & e \\ f & -a & h & i & j + t \\ 0 & 0 & 0 & \ell & m \\ 0 & 0 & 0 & a & b \\ 0 & 0 & 0 & f & -a \end{pmatrix}$$

est réalisée si et seulement si l'une des conditions suivantes est satisfaite :

$$\begin{cases} a = f = b = c = h = 0 \\ b\ell^2 = -fm^2, a\ell = -fm, \delta m\ell = -m^2i + mj\ell + e\ell^2, c\ell = -hm \end{cases}$$

Pour l'ensemble  $G_{2,2}$ , les mineurs  $(3, 3)$  de la matrice

$$\begin{pmatrix} 0 & b + t & c & \delta & e \\ 0 & 0 & b + t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f & g & h \\ 0 & 0 & i & j & -g \end{pmatrix}$$

sont nuls pour tout réel  $t$  si et seulement si  $g = h = j = 0$ .

On décrit maintenant  $G_{3,1}$  ; la matrice

$$\begin{pmatrix} 0 & c & e + t & g & i \\ 0 & 0 & \delta & f + t & h \\ 0 & 0 & 0 & c & e + t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \delta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

est de rang inférieur ou égal à 3 si et seulement si  $c\delta = 0$ .

Passons à la description de  $G_{3,2}$  ; l'annulation pour tout réel  $t$  des mineurs  $(4, 4)$  de la matrice

$$\begin{pmatrix} 0 & b + t & c & \delta & e \\ 0 & 0 & b + t & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b + t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f & 0 \end{pmatrix}$$

est réalisée si et seulement si  $b = e = f = 0$ .

Pour  $G_4$ , il n'y a rien à faire.  $\square$

On aborde maintenant la classification des  $\mathcal{L}$ -feuilletages associés aux algèbres  $\mathcal{L}_\alpha$ .

On se permettra d'effectuer certaines combinaisons linéaires dites permises qui vont changer  $\mathcal{L}'$  tout en gardant la même structure d'algèbre : par exemple, les algèbres  $\langle X, Y, Z \rangle$  et  $\langle X + \kappa R, Y, Z \rangle$  sont distinctes mais isomorphes et tangentes au même feuilletage.

**3.1. Cas où les matrices  $Y, Z \in F_4$ .** C'est le cas où  $Y$  s'écrit

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

et où  $Z$  est de la forme

$$\begin{pmatrix} 0 & b & c & \delta & e \\ 0 & 0 & b & c & \delta \\ 0 & 0 & 0 & b & c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Pour des raisons techniques de calcul, on cherche  $X \in \chi(\mathbf{CP}(4))$ ,  $\lambda, \mu, \beta, \varepsilon \in \mathbf{C}$  et  $Z$  du type précédent satisfaisant

$$[X, Y] = \lambda Y + \mu Z, \quad [X, Z] = \beta Y + \varepsilon Z$$

La raison est qu'un élément générique de  $[\mathcal{L}_\alpha, \mathcal{L}_\alpha]$  peut être de rang 4 alors que les  $Y$  et  $Z$  de la présentation précédente peuvent ne pas l'être. Les équations traitées sont quadratiques et il n'est pas étonnant qu'arrivent plusieurs cas ; ils correspondent aux différentes composantes irréductibles des ensembles décrits par ces équations. On n'a retenu que les solutions donnant des feuilletages de degré trois, certaines donnant des feuilletages de degré plus bas ; ces solutions éliminées interviennent dans la classification des feuilletages de degré inférieur à trois.

Etudions les feuilletages associés aux solutions données par Maple. Nous présentons les calculs typiques et mentionnons par quelles techniques se traitent les autres cas.

3.1.1. Les champs  $X$  et  $Z$  s'écrivent respectivement à combinaisons linéaires permises près

$$\begin{aligned} X &= (bz_1 + cz_2 + \delta z_3 + ez_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + (\kappa z_1 + bz_2 + cz_3 + \delta z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} \\ &\quad + (2\kappa z_2 + bz_3 + cz_4) \frac{\partial}{\partial z_2} + (3\kappa z_3 + bz_4) \frac{\partial}{\partial z_3} + 4\kappa z_4 \frac{\partial}{\partial z_4}, \\ Z &= z_2 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_2} \end{aligned}$$

Dans ce cas

$$\begin{pmatrix} \lambda & \mu \\ \beta & \varepsilon \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \kappa & 0 \\ -b\kappa & 2\kappa \end{pmatrix}$$

Ceci implique que  $\kappa \neq 0$ ; par suite on peut supposer que  $\kappa = 1$ . On note que  $\tilde{\alpha} = \tilde{2}$ .

Quitte à faire des combinaisons linéaires permises, le champ  $X$  s'écrit

$$(-4z_0 + \delta z_3 + ez_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + (-3z_1 + \delta z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} - 2z_2 \frac{\partial}{\partial z_2} - z_3 \frac{\partial}{\partial z_3}$$

Les hyperplans  $z_4 = \text{cte}$  sont alors invariants par les trois champs qui engendrent donc le feuilletage restreint à la carte affine  $z_4 = 1$ . Dans cette carte affine, on a :

$$\tilde{X} = X|_{z_4=1} = (-4z_0 + \delta z_3 + e) \frac{\partial}{\partial z_0} + (-3z_1 + \delta) \frac{\partial}{\partial z_1} - 2z_2 \frac{\partial}{\partial z_2} - z_3 \frac{\partial}{\partial z_3}$$

$$\tilde{Y} = Y|_{z_4=1} = z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} + \frac{\partial}{\partial z_3}$$

$$\tilde{Z} = Z|_{z_4=1} = z_2 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_1} + \frac{\partial}{\partial z_2}$$

Les champs  $\tilde{Y}$  et  $\tilde{Z}$  ont une « partie constante » donc ne s'annulent pas et commutent; nous allons essayer de les redresser par un automorphisme polynomial. Le flot de  $\tilde{Y}$  est

$$\varphi(z; t) = (z_0 + z_1 t + z_2 \frac{t^2}{2} + z_3 \frac{t^3}{6} + \frac{t^4}{24}, z_1 + z_2 t + z_3 \frac{t^2}{2} + \frac{t^3}{6}, z_2 + z_3 t + \frac{t^2}{2}, z_3 + t)$$

et celui de  $\tilde{Z}$

$$\psi : (z; s) \mapsto (z_0 + z_2 s + \frac{s^2}{2}, z_1 + z_3 s, z_2 + s, z_3)$$

On définit maintenant le difféomorphisme

$$H(z_0, z_1, z_2, z_3) = \varphi(\psi(z_0, z_1, 0, 0; z_2); z_3)$$

qui est donné par

$$(z_0 + \frac{z_2^2}{2} + z_1 z_3 + \frac{z_2 z_3^2}{2} + \frac{z_3^4}{24}, z_1 + z_2 z_3 + \frac{z_3^3}{6}, z_2 + \frac{z_3^2}{2}, z_3)$$

Par construction  $H$  conjugue  $\frac{\partial}{\partial z_3}$  à  $\tilde{Y}$  et  $\frac{\partial}{\partial z_2}$  à  $\tilde{Z}$ .

On note  $\tilde{\mathcal{F}}$  le feuilletage associé à l'algèbre engendrée par les champs  $\tilde{X}$ ,  $\tilde{Y}$  et  $\tilde{Z}$ ; soit  $\tilde{\Omega}$  une 1-forme qui définit  $\tilde{\mathcal{F}}$ . Le feuilletage  $\mathcal{F}' = H^* \tilde{\mathcal{F}}$  est décrit par une 1-forme  $\Omega'$  qui annule les champs  $H_*^{-1} \tilde{Y} = \frac{\partial}{\partial z_3}$  et  $H_*^{-1} \tilde{Z} = \frac{\partial}{\partial z_2}$ . Elle s'écrit donc du fait de l'intégrabilité

$$\Omega' = A'(z_0, z_1) dz_0 + B'(z_0, z_1) dz_1$$

Le difféomorphisme  $H$  laisse le plan  $z_2 = z_3 = 0$  invariant point par point, donc  $\Omega' = \text{cte } \iota^* \tilde{\Omega}$  où

$$\iota : (z_0, z_1) \mapsto (z_0, z_1, 0, 0)$$

et  $\Omega'$  définit  $\tilde{\mathcal{F}}|_{z_2=z_3=0}$ . On constate que le champ

$$\tilde{X}|_{z_2=z_3=0} = (-4z_0 + e) \frac{\partial}{\partial z_0} + (-3z_1 + \delta) \frac{\partial}{\partial z_1}$$

décrit le feuilletage en restriction au 2-plan  $z_2 = z_3 = 0$ . On déduit une intégrale première de  $\tilde{\mathcal{F}}|_{z_2=z_3=0}$  :

$$\frac{(z_0 - \frac{e}{4})^3}{(z_1 - \frac{\delta}{3})^4}$$

qui donne après composition avec  $H^{-1}$  et homogénéisation

$$\frac{\left(z_0 z_4^3 - \frac{z_2^2 z_4^2}{2} - z_1 z_3 z_4^2 + z_2 z_3^2 z_4 - \frac{z_3^4}{4} - \frac{e}{4} z_4^4\right)^3}{\left(z_1 z_4^2 - z_2 z_3 z_4 + \frac{z_3^3}{3} - \frac{\delta}{3} z_4^3\right)^4}$$

à conjugaison près s'écrit

$$\frac{\left(z_0 z_4^3 - \frac{z_2^2 z_4^2}{2} - z_3 z_4^2 + z_2 z_3^2 z_4 - \frac{z_3^4}{4}\right)^3}{\left(z_1 z_4^2 - z_2 z_3 z_4 + \frac{z_3^3}{3}\right)^4}$$

A posteriori, on constate que ce cas s'obtient à partir de 3.1.3. en faisant  $\kappa = 0$ .

3.1.2. Les champs  $X$  et  $Z$  sont à combinaisons linéaires permises près (Maple)

$$X = (\xi_1 z_1 + \xi_2 z_2 + \xi_3 z_3 + \xi_4 z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + 4(b\eta + \varsigma) z_4 \frac{\partial}{\partial z_4}$$

$$\begin{aligned}
 & + ((b\eta + \varsigma)z_1 + \xi_1 z_2 + (\xi_2 + \eta\delta)z_3 + z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} \\
 & + (2(b\eta + \varsigma)z_2 + \xi_1 z_3 + (\xi_2 + 2\eta\delta)z_4) \frac{\partial}{\partial z_2} + (3(b\eta + \varsigma)z_3 + \xi_1 z_4) \frac{\partial}{\partial z_3}, \\
 & Z = (bz_1 + \delta z_3) \frac{\partial}{\partial z_0} + (bz_2 + \delta z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} + bz_3 \frac{\partial}{\partial z_2} + bz_4 \frac{\partial}{\partial z_3}
 \end{aligned}$$

et

$$\begin{pmatrix} \lambda & \mu \\ \beta & \varepsilon \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varsigma & \eta \\ -b(3b\eta + 2\varsigma) & 4\eta b + 3\varsigma \end{pmatrix}$$

Les valeurs propres de cette matrice sont  $3(\varsigma + b\eta)$  et  $\varsigma + b\eta$  donc  $\tilde{\alpha} = \tilde{3}$ . On remarque que  $\varsigma + b\eta$  est non nul.

On note que si  $\delta = 0$ , la dimension ponctuelle de  $\mathcal{L}$  est deux. Quitte à changer  $Z$  en  $\frac{1}{\delta}(Z - bY)$ , le champ  $Z$  s'écrit

$$z_3 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_1}$$

A combinaisons linéaires et conjugaison près, on a

$$\begin{aligned}
 X = & (-4(b\eta + \varsigma)z_0 + \xi_4 z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + (-3(b\eta + \varsigma)z_1 + \eta\delta z_3) \frac{\partial}{\partial z_1} \\
 & + (-2(b\eta + \varsigma)z_2 + 2\mu\delta z_4) \frac{\partial}{\partial z_2} - (b\eta + \varsigma)z_3 \frac{\partial}{\partial z_3}
 \end{aligned}$$

On traite ce cas de la même manière qu'en 3.1.1 et une intégrale première de  $\mathcal{F}$  est à conjugaison près

$$\frac{\left(z_2 z_4 - \frac{z_3^2}{2} - \kappa z_4^2\right)^2}{\left(2(b\eta + \varsigma)(z_1 z_3 z_4^2 + \frac{z_2 z_3^2 z_4}{2} - \frac{z_3^4}{8})\right) + z_0 z_4^3}$$

avec

$$\kappa = \frac{2\eta\delta}{2(b\eta + \varsigma)}$$

On peut en fait conjuguer la fonction rationnelle précédente à

$$\frac{(z_2 z_4 - z_3^2)^2}{z_1 z_3 z_4^2 + z_2 z_3^2 z_4 - z_3^4 + z_0 z_4^3}$$

3.1.3. A combinaisons linéaires près on a suivant Maple :

$$\begin{aligned}
X &= (\xi_1 z_1 + \xi_2 z_2 + \xi_3 z_3 + \xi_4 z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} - \frac{8\varsigma c^2}{\delta} z_4 \frac{\partial}{\partial z_4} \\
&+ \left( -\frac{2\varsigma c^2}{\delta} z_1 + (\xi_1 + \varsigma c) z_2 + (\xi_2 + \varsigma \delta) z_3 + \frac{4\xi_3 c + 5\varsigma \delta^2}{4c} z_4 \right) \frac{\partial}{\partial z_1} \\
&+ \left( -\frac{4\varsigma c^2}{\delta} z_2 + (\xi_1 + 2\varsigma c) z_3 + (\xi_2 + 2\varsigma \delta) z_4 \right) \frac{\partial}{\partial z_2} \\
&+ \left( -\frac{6\varsigma c^2}{\delta} z_3 + (\xi_1 + 3\varsigma c) z_4 \right) \frac{\partial}{\partial z_3}, \\
Z &= (bz_1 + cz_2 + \delta z_3 + \frac{5\delta^2}{4c} z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + (bz_2 + cz_3 + \delta z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} \\
&+ (bz_3 + cz_4) \frac{\partial}{\partial z_2} + bz_4 \frac{\partial}{\partial z_3}
\end{aligned}$$

et

$$\begin{pmatrix} \lambda & \mu \\ \beta & \varepsilon \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\varsigma(\delta b + 2c^2)}{\delta} & \varsigma \\ -\frac{b\varsigma(\delta b - 2c^2)}{\delta} & \frac{\varsigma(\delta b - 4c^2)}{\delta} \end{pmatrix}$$

On remarque que  $c, \varsigma, \delta \neq 0$  et que  $\tilde{\alpha} = \tilde{2}$ .

Notons

$$\kappa = \frac{\delta}{c}, \quad \xi'_4 = \frac{\kappa}{\varsigma c} (\xi_4 - 5\xi_2 \kappa^2) \text{ et } \xi'_3 = \frac{\kappa}{\varsigma c} (\xi_3 - \xi_2 \kappa)$$

Quitte à faire des combinaisons linéaires de  $Z$  avec  $Y$ , le champ  $Z$  s'écrit

$$(z_2 + \kappa z_3 + \frac{5}{4} \kappa^2 z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + (z_3 + \kappa z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_2}$$

De même à combinaisons linéaires permises près on a

$$\begin{aligned}
X &= (8z_0 + \xi'_3 z_3 + \xi'_4 z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + (6z_1 + \kappa z_2 + \kappa^2 z_3 + (\xi'_3 + \frac{5}{4} \kappa^3) z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} \\
&+ (4z_2 + 2\kappa z_3 + 2\kappa^2 z_4) \frac{\partial}{\partial z_2} + (2z_3 + 3\kappa z_4) \frac{\partial}{\partial z_3}
\end{aligned}$$

On trouve que  $\mathcal{F}$  admet comme intégrale première

$$\frac{\left( (z_1 - \kappa z_2) z_4^2 + (\frac{\kappa z_3^2}{2} - z_2 z_3) z_4 + \frac{z_3^3}{3} + (\frac{\xi'_3}{6} - \frac{\kappa^3}{8}) z_4^3 \right)^4}{\left( (2z_0 + \frac{\kappa^2}{2} z_2 - 3\kappa z_1) z_4^3 + ((3\kappa z_2 - 2z_1) z_3 - \frac{\kappa^2}{4} z_3^2 - z_2^2) z_4^2 + (2z_2 z_3^2 - \kappa z_3^3) z_4 - \frac{z_3^4}{2} - \eta z_4^4 \right)^3}$$

avec

$$\eta = \frac{3\kappa \xi'_3}{8} + \frac{11\kappa^4}{32} + \frac{\xi'_4}{4}$$



soit à conjugaison près

$$\frac{\left(z_1 z_4^2 - z_2 z_3 z_4 + \frac{z_3^3}{3}\right)^4}{\left(z_0 z_4^3 - (2z_1 z_3 + z_2^2) z_4^2 - \frac{z_3^4}{2}\right)^3}$$

REMARQUES. 1. Ce feuilletage, ainsi que celui produit en 3.1.1, n'appartient pas aux composantes connues de l'espace des feuilletages de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$ ; c'est un candidat à être un feuilletage « **exceptionnel** ».

2. Une dégénérescence de ce cas correspond à  $\delta = 0$  (multiplier les constantes par  $\delta$  et annuler  $\delta$ ). On obtient l'algèbre engendrée par les champs

$$R, X = 4z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + 3z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + 2z_2 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_3}$$

$$Y = z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad Z = z_2 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_2}$$

qui correspond en fait au cas  $\kappa = 0$ , i.e. 3.1.1.

La dégénérescence  $\varsigma = 0$  produit  $\alpha = 0$  et n'est donc pas à considérer ici.

3. On constate que lorsque le rang générique de  $\langle Y, Z \rangle$  est maximal l'invariant  $\tilde{\alpha}$  est discret et vaut  $\tilde{2}$  ou  $\tilde{3}$ .

**3.2. Les matrices  $Y, Z \in F_3$ .** Comme précédemment on cherche  $X$  dans  $\chi(\mathbf{CP}(4))$ ,  $\lambda, \mu, \beta, \varepsilon \in \mathbf{C}$  satisfaisant

$$[X, Y] = \lambda Y + \mu Z \text{ et } [X, Z] = \beta Y + \varepsilon Z$$

Grâce à Maple, on obtient les sept solutions suivantes que l'on étudie au cas par cas. On n'a retenu que les solutions donnant des feuilletages de degré 3.

3.2.1. Les champs  $X, Y$  et  $Z$  s'écrivent respectivement à combinaisons linéaires permises près

$$X = \left(-\frac{1}{2}\sigma z_0 + \xi_1 z_1 + \xi_2 z_2 + \xi_3 z_3 + \xi_4 z_4\right) \frac{\partial}{\partial z_0}$$

$$+ \left(-\frac{1}{2} \frac{i\sigma + 2k(g\zeta - \xi_1)}{g} z_2 + \xi_8 z_3 + \xi_9 z_4\right) \frac{\partial}{\partial z_1}$$

$$+ \left(\frac{1}{2}\sigma z_2 + (\xi_1 + \zeta g) z_3 + (\xi_2 + \zeta i) z_4\right) \frac{\partial}{\partial z_2}$$

$$+ \left(\sigma z_3 - \frac{1}{2} \frac{i\sigma - 2\xi_1 k}{g} z_4\right) \frac{\partial}{\partial z_3} + \frac{3}{2}\sigma z_4 \frac{\partial}{\partial z_4},$$

$$Y = z_2 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_2},$$

$$Z = (gz_3 + iz_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + kz_4 \frac{\partial}{\partial z_1}, \quad k \neq 0$$

et

$$\begin{pmatrix} \lambda & \mu \\ \beta & \varepsilon \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma & \zeta \\ 0 & \frac{3\sigma}{2} \end{pmatrix}$$

On note que  $\tilde{\alpha} = \frac{3}{2}$ .

Le feuilletage associé à l'algèbre engendrée par les champs  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  et  $R$  admet pour intégrale première

$$\frac{z_4 \left( \left( \frac{g}{k}(z_2 - z_1)z_3 - \frac{z_2^2}{2} - \kappa z_3^2 + \frac{i}{k}z_2z_3 \right)z_4 + (z_0 - \frac{i}{k}z_1 - \eta z_3)z_4^2 - 2Cz_3^3 + \nu z_4^3 \right)}{\left( z_3 + \frac{\xi'_1}{\sigma}z_4 \right)^4}$$

où

$$\xi'_1 = \frac{i\sigma - 2\xi_1k}{g}, \quad \xi'_2 = \frac{(\xi_2 - \xi_8 + \zeta i)i - \xi_9g}{k} + \xi_3,$$

$$\xi'_3 = i\frac{\xi_1 + 2\zeta g}{k} + \frac{(\xi_2 - \xi_8)g}{k}, \quad \xi'_4 = \frac{g(\xi_1 + \zeta g)}{k} \text{ et } \xi'_5 = \xi_4 - \frac{i\xi_9}{k}$$

$$A = \frac{\xi'_2}{\sigma} - \frac{2\xi'_1\xi'_3}{\sigma^2} + \frac{3\xi'^2_1\xi'_4}{\sigma^3}, \quad B = \frac{\xi'_3}{\sigma} - \frac{3\xi'_4\xi'_1}{\sigma^2}, \quad C = \frac{\xi'_4}{\sigma},$$

$$\xi''_1 = \frac{\xi'_5}{\sigma} - \frac{\xi'_2\xi'_1}{\sigma^2} + \frac{\xi'^2_1\xi'_3}{\sigma^3} - \frac{\xi'^3_1\xi'_4}{\sigma^4}, \quad \kappa = B + \frac{6C\xi'_1}{\sigma},$$

$$\eta = \frac{2A}{3} + \frac{2\xi'_1B}{\sigma} + \frac{6C\xi'^2_1}{\sigma^2} \text{ et } \nu = -\frac{\xi''_1}{2} - \frac{B\xi'^2_1}{\sigma^2} - 2C\frac{\xi'^3_1}{\sigma^3} - \frac{2A\xi'_1}{3\sigma}$$

ou encore à conjugaison près

$$\frac{z_4(z_0z_4^2 + z_1z_3z_4 + z_2^2z_4 + az_3^3)}{z_3^4}$$

où  $a \in \{0, 1\}$ .

REMARQUE. Dans la carte affine  $z_3 = 1$ , le feuilletage admet pour intégrale première à conjugaison près

$$z_4(z_0z_4^2 + z_1z_4 + z_2^2z_4 + a)$$

Il produit donc un polynôme de degré quatre sur  $\mathbf{C}^4$  définissant un  $\mathcal{L}$ -feuilletage.

3.2.2. Les champs  $X, Y$  et  $Z$  sont à combinaisons linéaires permises près

$$\begin{aligned} X &= \left( \frac{(e-f)(\xi_7 + \kappa k)}{k} z_0 + \xi_3 z_3 + \xi_4 z_4 \right) \frac{\partial}{\partial z_0} \\ &+ (\xi_7 z_2 + (\xi_8 - \xi_2) z_3 + \xi_9 z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} + \left( \frac{(e-f)\xi_7}{k} z_2 + \kappa i z_4 \right) \frac{\partial}{\partial z_2} \\ &+ (2\kappa(f-e) z_3 + (\xi_7 + \kappa k) z_4) \frac{\partial}{\partial z_3} + \frac{(f-e)(\kappa k - \xi_7)}{k} z_4 \frac{\partial}{\partial z_4}, \\ Y &= z_2 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_2}, \\ Z &= i z_4 \frac{\partial}{\partial z_0} + ((f-e) z_3 + k z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} \quad i \neq 0, k \neq 0 \end{aligned}$$

et

$$\begin{pmatrix} \lambda & \mu \\ \beta & \varepsilon \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \kappa(f-2e) & \kappa \\ -ef\kappa & \kappa(2f-e) \end{pmatrix}$$

Les valeurs propres de cette matrice sont  $\kappa(f-e)$  et  $2\kappa(f-e)$  donc  $\tilde{\alpha} = \tilde{2}$ .

On montre que le feuilletage associé à l'algèbre engendrée par les champs  $X, Y, Z$  et  $R$  admet pour intégrale première

$$\frac{z_4^{3\xi'_5 - \xi'_1} \left( z_3 + \frac{\xi'_6}{\xi'_5} z_4 \right)^{\xi'_1}}{\left( z_1 z_4^2 - z_2 z_3 z_4 + \left( \frac{f-e}{2i} z_3 - \frac{k}{2i} z_4 \right) (z_2^2 - 2z_0 z_4) - (A + 2B \frac{\xi'_6}{\xi'_5}) z_3 z_4^2 - B z_3^2 z_4 - \nu z_4^3 \right)^{\xi'_5}}$$

avec

$$\xi'_1 = \frac{(f-e)(\xi_7 - k\kappa)}{k}, \quad \xi'_5 = \frac{(\kappa k + \xi_7)(f-e)}{k}, \quad \xi'_6 = \xi_7 + \kappa k,$$

$$A = \frac{\xi'_2 \xi'_5 - 2\xi'_3 \xi'_6}{\xi'_5(\xi'_5 - \xi'_1)}, \quad B = \frac{\xi'_3}{2\xi'_5 - \xi'_1} \text{ et}$$

$$\nu = -\frac{\xi'_2 \xi'_6}{\xi'_1 \xi'_5} + \frac{\xi'_3 \xi'^2_6}{\xi'_1 \xi'^2_5} + \frac{\xi'_4}{\xi'_1} - A \frac{\xi'_6}{\xi'_5} - B \frac{\xi'^2_6}{\xi'^2_5}$$

Cette intégrale première est conjuguée à :

$$\frac{z_4^{3\xi'_5 - \xi'_1} z_3^{\xi'_1}}{(z_1 z_4^2 + z_2 z_3 z_4 + z_2^2 z_3 + z_0^2 z_4)^{\xi'_5}}$$

3.2.3. A combinaisons linéaires permises près on a

$$\begin{aligned} X &= ((-\nu z_0 + \xi_3 z_3 + \xi_4 z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + (\xi_8 z_3 + \xi_9 z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} \\ &+ ((-\nu - \delta) z_2 + \varsigma i z_4) \frac{\partial}{\partial z_2} - 2\delta z_3 \frac{\partial}{\partial z_3} + (-\nu - 2\delta) z_4 \frac{\partial}{\partial z_4}, \\ Y &= z_2 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_2}, \\ Z &= i z_4 \frac{\partial}{\partial z_0} + (f - e) z_3 \frac{\partial}{\partial z_1} \quad i \neq 0, f - e \neq 0 \end{aligned}$$

où  $\delta = \varsigma(e - f)$  et

$$\begin{pmatrix} \lambda & \mu \\ \beta & \varepsilon \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varsigma(-2e + f) & \varsigma \\ -e\varsigma f & \varsigma(2f - e) \end{pmatrix}$$

On note que  $\tilde{\alpha} = \tilde{2}$ .

Posons

$$\eta = \xi_8 - \xi_2 - \varsigma i - \frac{\xi_4}{i}(f - e)$$

et

$$\kappa = \frac{\xi_3(e - f)}{i}$$

Si  $\nu + 2\delta = 0$ , le feuilletage associé à l'algèbre engendrée par les champs  $X, Y, Z$  et  $R$  admet pour intégrale première

$$\left(\frac{z_3}{z_4}\right)^{\xi_9} \exp\left(\frac{\eta z_3 z_4^2 + \frac{\kappa}{2} z_3^2 z_4 - \nu(z_1 z_4^2 - z_2 z_3 z_4 - \frac{f-e}{i} z_0 z_3 z_4 + \frac{f-e}{2i} z_2^2 z_3)}{z_4^3}\right)$$

c'est-à-dire à conjugaison près

$$\left(\frac{z_3}{z_4}\right)^{\xi_9} \exp\left(\frac{z_1 z_4^2 + z_0 z_3 z_4 + z_2^2 z_3}{z_4^3}\right)$$

Si  $2\delta + \nu \neq 0$  et  $2\delta - \nu \neq 0$ , alors le feuilletage admet pour intégrale première

$$\frac{z_3^{2\delta+\nu} z_4^{2(\nu-\delta)}}{(z_1 z_4^2 - z_2 z_3 z_4 - \frac{f-e}{i} z_0 z_3 z_4 + \frac{f-e}{2i} z_2^2 z_3 + \frac{\eta}{2\delta} z_3 z_4^2 - \frac{\kappa}{2\delta-\nu} z_3^2 z_4 + \frac{\xi_9}{2\delta+\nu} z_4^3)^{\nu}}$$

i.e. à conjugaison près

$$\frac{z_3^{2\delta+\nu} z_4^{2(\nu-\delta)}}{(z_1 z_4^2 + z_0 z_3 z_4 + z_2^2 z_3)^{\nu}}$$

Finalement si  $2\delta + \nu \neq 0$  et  $\nu = 2\delta$ , l'intégrale première s'écrit

$$\left(\frac{z_3}{z_4}\right)^\beta \exp\left(\frac{2\delta(z_1 z_4^2 - z_2 z_3 z_4 - \frac{f-e}{i} z_0 z_3 z_4 + \frac{f-e}{2i} z_2^2 z_3)}{z_3^2 z_4}\right)$$

ou encore à conjugaison près

$$\left(\frac{z_3}{z_4}\right)^{\frac{\beta}{2\delta}} \exp\left(\frac{z_1 z_4^2 + z_0 z_3 z_4 + z_2^2 z_3}{z_3^2 z_4}\right)$$

3.2.4. Les champs  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  s'écrivent à combinaisons linéaires près

$$\begin{aligned} X &= \left(2\varsigma(f-e)z_0 - 2\varsigma g z_1 + \frac{\varsigma i(2e-f) + g(\xi_7 + 3\varsigma k) + i\eta}{\delta} z_3 + \xi_4 z_4\right) \frac{\partial}{\partial z_0} \\ &+ \left(-2\varsigma \delta z_0 + \xi_7 z_2 + (\xi_8 + \frac{3\varsigma i \delta + \xi_7(f-e) + \varsigma k(2f-e) + k\eta - \xi_8 \delta}{\delta}) z_3 + \xi_9 z_4\right) \frac{\partial}{\partial z_1} \\ &+ ((\eta + \varsigma(2f-e))z_2 - \varsigma g z_3 + \varsigma i z_4) \frac{\partial}{\partial z_2} \\ &+ (-\varsigma \delta z_2 + (\eta + \varsigma f)z_3 + (\xi_7 + \varsigma k)z_4) \frac{\partial}{\partial z_3} + 2(\varsigma f + \eta)z_4 \frac{\partial}{\partial z_4}, \\ Y &= z_2 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_2}, \\ Z &= (g z_3 + i z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + (\delta z_2 + (f-e)z_3 + k z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} + \delta z_4 \frac{\partial}{\partial z_3} \end{aligned}$$

On traite ce cas comme d'habitude en trivialisant deux champs tangents dans la carte affine  $z_4 = 1$ . Suivant les valeurs du paramètre, on trouve les intégrales premières suivantes :

$$\frac{(P - \gamma^+ Q)^{\vartheta^+} (P - \gamma^- Q)^{\vartheta^-}}{z_4^2}$$

si  $e^2 + \delta g \neq 0$ ,

$$\left(\frac{P - \frac{e}{2\delta} Q}{z_4^2}\right)^{\varsigma \delta} \exp\left(\frac{\varsigma P}{P - \frac{e}{2\delta} Q}\right)$$

sinon. Les polynômes  $P$  et  $Q$  sont définis par :

$$\begin{aligned} P(z_0, z_1, z_2, z_3, z_4) &= z_0 z_4 - \frac{g z_3^2}{2\delta} - \frac{i z_3 z_4}{\delta} - \frac{z_2^2}{2} + \kappa_0 z_4^2 \\ Q(z_0, z_1, z_2, z_3, z_4) &= z_1 z_4 - \frac{f-e}{2\delta} z_3^2 - \frac{k}{\delta} z_3 z_4 - z_2 z_3 - \kappa_1 z_4^2 \end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned}\kappa_0 &= \frac{(2\varsigma i \varsigma k) \eta}{2\delta(\varsigma^2 g \delta - \varsigma e \eta - \eta^2)}, \quad \varsigma = -\frac{2\delta}{e} \left( \frac{\varsigma e}{2} + \eta \right) \\ \kappa_1 &= \frac{(\delta \varsigma \xi_4 + 2f(\varsigma e + \eta))\delta \varsigma - \xi_9 \delta(\eta + e \varsigma) + (\xi_7 + \varsigma k)(e \varsigma k - i \delta \varsigma + \eta k)}{2(\varsigma^2 g \delta - \varsigma e \eta - \eta^2) \delta} \\ \gamma^\pm &= \frac{e \pm \sqrt{(e^2 + 4g\delta)}}{2\delta} \text{ et } \vartheta^\pm = \frac{1}{2} \left( 1 \pm \frac{2\eta + e \varsigma}{\sqrt{\varsigma^2(e^2 + 4g\delta)}} \right)\end{aligned}$$

Ce qui donne à conjugaison près

$$\frac{\left( (z_0 - \gamma^+ z_1) z_4 + \frac{\gamma^+(f-e)-g}{2\delta} z_3^2 - \frac{z_2^2}{2} + \gamma^+ z_2 z_3 \right)^{\vartheta^+} \left( (z_0 - \gamma^- z_1) z_4 + \frac{\gamma^-(f-e)-g}{2\delta} z_3^2 - \frac{z_2^2}{2} + \gamma^- z_2 z_3 \right)^{\vartheta^-}}{z_4^2}$$

si  $e^2 + \delta g \neq 0$ ,

$$\frac{(z_0 - z_1) z_4 + e z_2 z_3 - \frac{z_2^2}{2} + v z_3^2}{z_4^2} \exp \left( \frac{\varsigma \left( z_0 z_4 - 2g \delta z_3^2 - \frac{z_2^2}{2} \right)}{(z_0 - z_1) z_4 + e z_2 z_3 - \frac{z_2^2}{2} + v z_3^2} \right)$$

avec

$$v = e(f - e) - 2g\delta$$

sinon. On peut éventuellement simplifier encore ces expressions ; mais il faut tenir compte de l'annulation ou non de certains paramètres. Nous en laissons le soin au lecteur.

3.2.5. Etudions le cas suivant prédit par Maple :

$$Y = z_2 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_2}$$

$$Z = (z_1 + g z_3 + i z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + (f z_3 + k z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2}$$

Notons, et ceci se constate dans les cartes  $z_4 = 1$  puis  $z_3 = 1$  que l'on peut par conjugaison supposer que  $g = i = 0$ . Lorsqu'on demande à Maple  $X, \lambda, \mu, \varepsilon, \beta$  tels que  $[X, Y] = \lambda X + \mu Y$  et  $[X, Z] = \beta X + \varepsilon Y$  il donne

$$\begin{aligned}X &= (\xi_3 z_3 + \xi_4 z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} \\ &+ ((\zeta + \delta f) z_1 + \delta k z_2 + \xi_1 k z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} + (\delta z_1 + \zeta z_2) \frac{\partial}{\partial z_2} \\ &+ (2(\zeta + \delta f) z_3 + 2\delta k z_4) \frac{\partial}{\partial z_3} + (2\delta z_3 + 2\delta z_4) \frac{\partial}{\partial z_4}\end{aligned}$$

et

$$\begin{pmatrix} \lambda & \mu \\ \beta & \varepsilon \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \zeta & \delta \\ \delta k & \delta f + \zeta \end{pmatrix}$$

matrice qui doit être inversible.

Les méthodes que nous avons appliquées jusqu'ici conduisent à des calculs relativement pénibles. Nous allons essayer une autre méthode ; supposons que l'on puisse trouver  $X'$  tel que par exemple  $[X, X'] = 0$  et tel que  $X'$  ne soit pas tangent au feuilletage. Alors  $X'$  est nécessairement une symétrie ; ce qui produit un facteur intégrant qui en principe permet de calculer l'intégrale première. Cherchons par exemple, et cela conviendra dans presque tous les cas ( $\delta \neq 0$ ),  $X'$  sous la forme

$$(\xi'_3 z_3 + \xi'_4 z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_2} + 2z_3 \frac{\partial}{\partial z_3} + 2z_4 \frac{\partial}{\partial z_4}$$

ceci correspondant aux choix  $\mu' = 0$  et  $\lambda' = 1$ . Pour que  $[X, X'] = 0$  il faut et il suffit que l'on ait

$$\begin{cases} (\zeta + \delta f)\xi'_3 + \delta\xi'_4 = \xi_3 \\ \delta k\xi'_3 + \zeta\xi'_4 = \xi_4 \end{cases}$$

qui possède une solution unique puisque la matrice

$$\begin{pmatrix} \zeta & \delta \\ \delta k & \delta f + \zeta \end{pmatrix}$$

est inversible. Dans le cas où  $\delta \neq 0$  on vérifie que  $X'$  n'est pas tangent au feuilletage ; par contre, lorsque  $\delta = 0$ , le champ  $X'$  est colinéaire à  $X$ . La résolution explicite de  $\xi'_3$  et  $\xi'_4$  donne

$$\xi'_3 = \frac{\zeta\xi_3 - \delta\xi_4}{\nu} \quad \text{et} \quad \xi'_4 = \frac{-\mu k\xi_3 + (\zeta + \delta f)\xi_4}{\nu}$$

avec

$$\nu = \zeta(\zeta + \delta f) - \delta^2 k$$

On procède alors au calcul de

$$\omega = i_X i_Y i_Z i_R dz_0 \wedge dz_1 \wedge dz_2 \wedge dz_3 \wedge dz_4$$

1-forme qui décrit le feuilletage et de

$$P = \omega(X') = i_{X'} i_X i_Y i_Z dz_0 \wedge dz_1 \wedge dz_2 \wedge dz_3 \wedge dz_4$$

facteur intégrant de cette 1-forme. Si  $\kappa = \sqrt{\delta^2 f^2 + 4\delta^2 k}$ , on constate que les deux hyperplans

$$(\delta f + \kappa)z_3 + 2\delta k z_4 = 0$$

et

$$(\delta f - \kappa)z_3 + 2\delta k z_4 = 0$$

sont invariants par le feuilletage car invariants par  $X$  et évidemment par  $Y$  et  $Z$ . Le polynôme  $P$  s'écrit donc à constante multiplicative près

$$((\delta f + \kappa)z_3 + 2\delta k z_4)((\delta f - \kappa)z_3 + 2\delta k z_4)Q$$

où

$$Q = -2\nu(k + fz_3 - z_3^2)z_0 - \nu(fz_3 + k)z_2^2 + 2\nu z_1 z_2 z_3 \\ - \nu z_1^2 - \sigma z_3^3 + (\varsigma + f\sigma)z_3^2 + (k\sigma - \varsigma f)z_3 - k\varsigma$$

avec

$$\varsigma = \xi_4 \zeta - \delta k \xi_3 + \delta \xi_4 f \text{ et } \sigma = \delta \xi_4 - \zeta \xi_3$$

Le polynôme  $Q$ , obtenu à l'aide de Maple, est de degré 3 ; génériquement sur les valeurs des paramètres il est irréductible. Ainsi génériquement le feuilletage associé à l'algèbre engendrée par les champs  $X$ ,  $Y$ ,  $R$  et  $Z$  admet une intégrale première de la forme

$$((\delta f + \kappa)z_3 + 2\delta k z_4)^{\lambda_0} ((\delta f - \kappa)z_3 + 2\delta k z_4)^{\lambda_1} \tilde{Q}^{\lambda_2}$$

où  $\tilde{Q}$  est l'homogénéisé de  $Q$  ; on constate que  $\tilde{Q}$  vaut :

$$-2\nu(kz_4^2 + fz_3 z_4 - z_3^2)z_0 - \nu(fz_3 + kz_4)z_2^2 + 2\nu z_1 z_2 z_3 \\ - \nu z_1^2 z_4 - \sigma z_3^3 + (\varsigma + f\sigma)z_3^2 z_4 + (k\sigma - \varsigma f)z_3 z_4^2 - k\varsigma z_4^3$$

Les  $\lambda_i$  se calculent à partir de  $\frac{\omega}{\omega(X)}$ .

Pour les valeurs non génériques des paramètres où le polynôme  $P$  n'est pas réduit, on trouve des intégrales premières contenant des exponentielles.

Le polynôme  $P$  s'écrit  $\delta^2 \tilde{P}$  donc s'annule pour  $\delta = 0$ . Par contre  $\tilde{P}$  ne s'annule pas pour  $\delta = 0$  et par suite est un facteur intégrant du feuilletage correspondant à  $\delta = 0$ . On traite ce cas comme d'habitude suivant les valeurs des paramètres ; il ne donne pas de phénomène nouveau.

3.2.6. A combinaisons linéaires permises près on a

$$X = (-3\varsigma z_0 + \xi_2 z_2 + \xi_3 z_3 + \xi_4 z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + (-2\varsigma z_1 + \gamma c z_2 + (\xi_2 + \gamma \delta) z_3) \frac{\partial}{\partial z_1} \\ + (-\varsigma z_2 + 2\gamma c z_3) \frac{\partial}{\partial z_2} + (\xi_0 z_3 + (\xi_1 - 3\varsigma) z_4) \frac{\partial}{\partial z_4}, \\ Y = z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_2 \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2}, \\ Z = (z_2 + \delta z_3) \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_1}$$

et

$$\begin{pmatrix} \lambda & \mu \\ \beta & \varepsilon \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varsigma & -\frac{\varsigma \delta}{2} \\ 0 & 2\varsigma \end{pmatrix}$$



On note que  $\varsigma \neq 0$  et  $\tilde{\alpha} = 2$ .

Si  $\xi_1 - 3\varsigma \neq 0$ , le feuilletage associé à l'algèbre engendrée par les champs  $X, Y, Z$  et  $R$  admet pour intégrale première

$$\frac{(z_4 + \kappa z_3)^{3\varsigma} \left( \xi_1(z_0 z_3^2 + \nu z_3^3 + \delta(\frac{z_2^2}{2} - z_1 z_3) z_3 - z_1 z_2 z_3 + \frac{1}{3} z_2^3) - \xi_4(z_4 + \kappa z_3) z_3^2 \right)^{\xi_1 - 3\varsigma}}{z_3^{3\xi_1 - 6\varsigma}}$$

avec

$$\kappa = \frac{\xi_0}{\xi_1 - 3\varsigma} \text{ et } \nu = \frac{1}{3\varsigma} (\xi_4 \kappa + \delta(\xi_2 + \mu\delta) - \xi_3)$$

A conjugaison près on obtient

$$\frac{z_4^{3\varsigma} (z_0 z_3^2 + z_1 z_2 z_3 + z_2^3)^{\xi_1 - 3\varsigma}}{z_3^{3\xi_1 - 6\varsigma}}$$

Si  $\xi_1 = 0$ , alors le feuilletage est décrit par

$$\left( \frac{z_4}{z_3} \right)^{\frac{\xi_4}{3\varsigma}} \exp \left( \frac{z_0 z_3^2 + \delta(\frac{1}{2} z_2^2 z_3 - z_1 z_3^2) - z_1 z_2 z_3 + \frac{1}{3} z_2^3}{z_3^2 z_4} \right)$$

ou encore à conjugaison près

$$\left( \frac{z_4}{z_3} \right)^{\frac{\xi_4}{3\varsigma}} \exp \left( \frac{z_0 z_3^2 + z_1 z_2 z_3 + z_2^3}{z_3^2 z_4} \right)$$

Pour  $\xi_1 - 3\varsigma = 0$ , on trouve comme intégrale première

$$\frac{(z_0 z_3^2 - \delta z_1 z_3^2 + \frac{\delta}{2} z_2^2 z_3 - z_1 z_2 z_3 + \frac{1}{3} z_2^3 + \rho z_3^3 - \frac{\xi_4}{3\varsigma} z_3^2 z_4)}{z_3^3} \exp \left( \frac{3\varsigma z_4}{\xi_0 z_3} \right)$$

avec

$$\rho = \frac{1}{3\varsigma} \left( \delta(\xi_2 + \mu\delta) - \xi_3 + \frac{\xi_0 \xi_4}{3\varsigma} \right)$$

A conjugaison près elle est de la forme

$$\frac{z_0 z_3^2 + z_1 z_2 z_3 + z_2^3}{z_3^3} \exp \left( \frac{z_4}{z_3} \right)$$

**3.3. Cas où les matrices  $Y, Z \in F_2$ .** Maple nous a donné trois types de champs  $Z$  que l'on va examiner.

3.3.1. Le premier cas est le suivant

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } Z = \begin{pmatrix} 0 & b & c & \delta & e \\ 0 & 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Les champs  $Z|_{z_2=0}$  et  $Y|_{z_2=0}$  sont colinéaires donc le feuilletage associé à l'algèbre  $\mathcal{L}$  ne peut être un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$ . En fait, il conduit à un  $\mathcal{L}$ -feuilletage quadratique.

3.3.2. Traitons le cas où

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } Z = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \delta & e \\ 0 & 0 & 0 & i & j \\ 0 & 0 & 0 & \ell & m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Si  $(\ell, m) = (0, 0)$ , alors le feuilletage associé à l'algèbre  $\mathcal{L}$  vient de  $\mathbf{CP}(2)$  donc n'est pas de degré 3.

Soit

$$P = \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \varepsilon & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \varepsilon \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

alors

$$PZP^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \delta + \varepsilon i & \varepsilon(j - \delta - \varepsilon i) + e \\ 0 & 0 & 0 & i + \varepsilon \ell & \varepsilon(m - \varepsilon \ell - i) + j \\ 0 & 0 & 0 & \ell & m - \varepsilon \ell \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

En particulier si  $\ell \neq 0$ , on peut, en posant  $\varepsilon = \frac{m}{\ell}$ , se ramener à  $m = 0$ .

Si  $\ell = 0$ , alors  $m \neq 0$  et  $i \neq 0$  sinon le degré chute, et

$$PZP^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \delta + \varepsilon i & \varepsilon(j - \delta - \varepsilon i) + e \\ 0 & 0 & 0 & i & \varepsilon(m - i) + j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Quitte à permuter  $z_3$  et  $z_4$ , puis  $z_0$  et  $z_1$ , on obtient

$$PZP^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \varepsilon(m - i) + j & i \\ 0 & 0 & 0 & \varepsilon(j - \delta - \varepsilon i) + e & \delta + \varepsilon i \\ 0 & 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

et

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

i.e. on s'est ramené au cas  $\ell \neq 0$  et  $m = 0$ .

Une fois  $Y$  et

$$Z = (\delta z_3 + e z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + (i z_3 + j z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2}$$

fixés, Maple donne :

$$\begin{aligned} X = & (\xi_0 z_0 - 2\mu e z_1 + (2\mu(\delta - j)^2 + 2\xi_5 e + 4i\mu e + (\xi_0 - \xi_6)(\delta - j))z_2 + \xi_3 z_3 + \xi_4 z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} \\ & + (\xi_5 z_0 + \xi_6 z_1 + (2i(\xi_0 - \xi_6) + (\xi_5 - 2i\mu)(j - \delta))z_2 + \xi_8 z_3 + \xi_9 z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} \\ & + (-\mu z_0 + (2\xi_0 + 3\mu(\delta - j) - \xi_6)z_2 + \xi_{13} z_3 + \xi_{14} z_4) \frac{\partial}{\partial z_2} \\ & + ((\xi_0 + \lambda + \mu\delta)z_3 - \mu e z_4) \frac{\partial}{\partial z_3} \\ & + ((\xi_5 + i\mu)z_3 + (\xi_6 + \lambda + \mu j)z_4) \frac{\partial}{\partial z_4}, \end{aligned}$$

Nous présentons le calcul de l'intégrale première, la procédure d'intégration étant sensiblement différente de celles déjà rencontrées.

Quitte à retrancher  $((\xi_0 + \lambda + \mu\delta)z_3 - \mu ez_4)R$  à  $X$ , le champ  $X$  n'a pas de composante en  $\frac{\partial}{\partial z_3}$ . Ainsi les trois champs engendrent le feuilletage restreint à la carte affine  $z_3 = 1$ ; dans cette carte affine, les champs  $Y$  et  $Z$  s'écrivent

$$\begin{aligned}\tilde{Y} &= Y|_{z_3=1} = \frac{\partial}{\partial z_0} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_1} \\ \tilde{Z} &= Z|_{z_3=1} = (\delta + ez_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + (i + jz_4) \frac{\partial}{\partial z_1} + \frac{\partial}{\partial z_2}\end{aligned}$$

Redressons les champs  $\tilde{Y}$  et  $\tilde{Z}$  par un automorphisme polynomial.

Le flot de  $\tilde{Y}$  est

$$\varphi : (z; t) \mapsto (z_0 + t, z_1 + z_4 t, z_2, z_4)$$

et celui de  $\tilde{Z}$

$$\psi : (z; s) \mapsto (z_0 + (\delta + ez_4)s, (i + jz_4)s + z_1, s + z_2, z_4)$$

On définit comme d'habitude le difféomorphisme

$$\begin{aligned}H(z_0, z_1, z_2, z_4) &= \varphi(\psi(0, z_1, 0, z_4; z_2); z_0) \\ &= (z_0 + (\delta + ez_4)z_2, z_1 + (i + jz_4)z_2 + z_0 z_4, z_2, z_4)\end{aligned}$$

Par construction  $H$  conjugue  $\frac{\partial}{\partial z_0}$  à  $\tilde{Y}$  et  $\frac{\partial}{\partial z_2}$  à  $\tilde{Z}$ . On note  $\tilde{\mathcal{F}}$  le feuilletage associé à l'algèbre engendrée par les champs  $\tilde{X} = X|_{z_3=1}$ ,  $\tilde{Y}$ ,  $\tilde{Z}$  et  $R|_{z_3=1}$ . On constate que le champ  $\tilde{X}|_{z_0=z_2=0}$ , quitte à le modifier avec des combinaisons ici polynomiales de  $R$ ,  $Y$  et  $Z$ , s'écrit

$$\begin{aligned}&((\xi_6 - \xi_0 - \lambda - \mu\delta)z_1 + 3\mu ez_1 z_4 + (\xi_9 - i\xi_{14} - \xi_3 - \xi_{13}(j - \delta))z_4 \\ &+ (\xi_{13}e + (\delta - j)\xi_{14} - \xi_4)z_4^2 + e\xi_{14}z_4^3 + \xi_8 - i\xi_{13}) \frac{\partial}{\partial z_1} \\ &+ ((\xi_5 + \mu i) + (\xi_6 - \xi_0 + \mu(j - \delta))z_4 + \mu ez_4^2) \frac{\partial}{\partial z_4}\end{aligned}$$

Il est tangent à  $\tilde{\mathcal{F}}$  et au 2-plan  $z_0 = z_2 = 0$ ; donc il décrit  $\tilde{\mathcal{F}}$  en restriction à ce 2-plan. Ce feuilletage est aussi défini par

$$\begin{aligned}\omega &= (\kappa_0 + \kappa_1 z_4 + \kappa_2 z_4^2) dz_1 \\ &+ (\kappa_3 z_1 - 3\kappa_2 z_1 z_4 + \kappa_5 z_4 + \kappa_6 z_4^2 + \kappa_7 z_4^3 + \kappa_8) dz_4\end{aligned}$$

avec

$$\begin{aligned}\kappa_0 &= \xi_5 + \mu i, \quad \kappa_1 = \xi_6 - \xi_0 + \mu(j - \delta) \\ \kappa_2 &= \mu e, \quad \kappa_3 = -\xi_6 + \xi_0 + \lambda + \mu\delta, \\ \kappa_5 &= -\xi_9 + i\xi_{14} + \xi_3 + \xi_{13}(j - \delta), \quad \kappa_6 = (j - \delta)\xi_{14} - \xi_{13}e + \xi_4,\end{aligned}$$

$$\kappa_7 = -e\xi_{14}, \quad \kappa_8 = i\xi_{13} - \xi_8$$

On regarde la forme  $\omega$  comme une équation différentielle linéaire avec second membre dont on cherche une solution particulière

$$z_1 = a_0 + a_1 z_4 + a_2 z_4^2 + a_3 z_4^3$$

En développant on obtient

$$\begin{aligned} & (\kappa_0 a_1 + \kappa_3 a_0 + \kappa_8) + (2\kappa_0 a_2 + (\kappa_1 + \kappa_3) a_1 - 3\kappa_2 a_0 + \kappa_5) z_4 \\ & + (3\kappa_0 a_3 + (2\kappa_1 + \kappa_3) a_2 - 2\kappa_2 a_1 + \kappa_6) z_4^2 + ((3\kappa_1 + \kappa_3) a_3 - \kappa_2 a_2 + \kappa_7) z_4^3 = 0 \end{aligned}$$

La résolution de cette équation conduit à

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{f} (3\kappa_0^3 \kappa_7 + 3\kappa_0^2 \kappa_2 \kappa_5 - 9\kappa_0 \kappa_1 \kappa_2 \kappa_8 + 5\kappa_0 \kappa_1 \kappa_3 \kappa_5 - 6\kappa_1^3 \kappa_8 - 5\kappa_0 \kappa_2 \kappa_3 \kappa_8 \\ & - \kappa_0^2 \kappa_3 \kappa_6 + 6\kappa_0 \kappa_1^2 \kappa_5 - 3\kappa_0^2 \kappa_1 \kappa_6 - 11\kappa_1^2 \kappa_3 \kappa_8 - 6\kappa_1 \kappa_3^2 \kappa_8 + \kappa_0 \kappa_3^2 \kappa_5 - \kappa_3^3 \kappa_8), \\ a_1 &= -\frac{1}{f} (3\kappa_2 \kappa_3^2 \kappa_8 + 3\kappa_0 \kappa_2 \kappa_3 \kappa_5 + 6\kappa_1^2 \kappa_3 \kappa_5 + 15\kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 \kappa_8 + 5\kappa_1 \kappa_3^2 \kappa_5 \\ & - \kappa_0 \kappa_3^2 \kappa_6 - 3\kappa_0 \kappa_1 \kappa_3 \kappa_6 + \kappa_3^3 \kappa_5 + 3\kappa_0^2 \kappa_3 \kappa_7 + 18\kappa_1^2 \kappa_2 \kappa_8 + 9\kappa_0 \kappa_2^2 \kappa_8), \\ a_2 &= -\frac{1}{f} (6\kappa_2^2 \kappa_3 \kappa_8 + 18\kappa_1 \kappa_2^2 \kappa_8 + 3\kappa_0 \kappa_2 \kappa_3 \kappa_6 + 9\kappa_0 \kappa_1 \kappa_2 \kappa_6 + 2\kappa_2 \kappa_3^2 \kappa_5 + \kappa_3^3 \kappa_6 \\ & - 3\kappa_0 \kappa_3^2 \kappa_7 + 4\kappa_1 \kappa_3^2 \kappa_6 + 3\kappa_1^2 \kappa_3 \kappa_6 - 3\kappa_0 \kappa_1 \kappa_3 \kappa_7 + 6\kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 \kappa_5 - 9\kappa_0^2 \kappa_2 \kappa_7), \\ a_3 &= -\frac{1}{f} (2\kappa_1^2 \kappa_3 \kappa_7 + \kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 \kappa_6 + 6\kappa_0 \kappa_1 \kappa_2 \kappa_7 + 3\kappa_1 \kappa_3^2 \kappa_7 + 3\kappa_0 \kappa_2^2 \kappa_6 \\ & + \kappa_2 \kappa_3^2 \kappa_6 + \kappa_3^3 \kappa_7 + 5\kappa_0 \kappa_2 \kappa_3 \kappa_7 + 6\kappa_2^3 \kappa_8 + 2\kappa_2^2 \kappa_3 \kappa_5) \end{aligned}$$

où

$$\begin{aligned} f &= 11\kappa_1^2 \kappa_3^2 + 6\kappa_1 \kappa_3^3 + \kappa_3^4 + 8\kappa_0 \kappa_2 \kappa_3^2 \\ &+ 6\kappa_1^3 \kappa_3 + 24\kappa_0 \kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 + 18\kappa_0 \kappa_1^2 \kappa_2 + 9\kappa_0^2 \kappa_2^2 \end{aligned}$$

Notons  $p(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3$  et posons  $z_1 = Z_1 + p(z_4)$ ; la nouvelle forme s'écrit alors

$$(\kappa_0 + \kappa_1 z_4 + \kappa_2 z_4^2) dZ_1 + Z_1 (\kappa_3 - 3\kappa_2 z_4) dz_4$$

soit encore

$$\frac{dZ_1}{Z_1} + \frac{\kappa_3 - 3\kappa_2 z_4}{\kappa_0 + \kappa_1 z_4 + \kappa_2 z_4^2} dz_4$$

qui s'intègre explicitement par décomposition en éléments simples; notons que  $\kappa_0 + \kappa_1 z_4 + \kappa_2 z_4^2 \neq 0$ . Il y a plusieurs cas suivant que le polynôme  $\kappa_0 + \kappa_1 z_4 + \kappa_2 z_4^2$  a des racines distinctes ou non.

Commençons par considérer le cas où le polynôme  $\kappa_0 + \kappa_1 z_4 + \kappa_2 z_4^2$  a deux racines distinctes

$$\gamma^\pm = \frac{-\kappa_1 \pm \sqrt{\kappa_1^2 - 4\kappa_0 \kappa_2}}{2\kappa_2}$$

Le feuilletage est alors décrit par la 1-forme

$$\frac{dZ_1}{Z_1} + \frac{1}{\kappa_2} \left( \frac{b}{z_4 - \gamma^-} + \frac{c}{z_4 - \gamma^+} \right) dz_4$$

avec

$$c = \frac{\kappa_2(\kappa_3 - 3\kappa_2\gamma^+)}{\sqrt{\kappa_1^2 - 4\kappa_0\kappa_2}}, \quad b = -3\kappa_2 - c$$

On en déduit l'intégrale première

$$\frac{P(z_0, z_1, z_2, z_3, z_4) (z_4 - \gamma^- z_3)^b (z_4 - \gamma^+ z_3)^c}{z_3^{3+b+c}}$$

où  $P$  s'écrit :

$$(z_1 - iz_2 - a_1 z_4) z_3^2 + ((\delta - j) z_2 - z_0) z_3 z_4 + (e z_2 - a_2 z_3) z_4^2 - a_0 z_3^3 - a_3 z_4^3$$

soit à conjugaison près

$$\frac{(z_1 z_3^2 + z_0 z_3 z_4 + e z_2 z_4^2 - a z_4^3) (z_4 - \varrho^- z_3)^b (z_4 - \varrho^+ z_3)^c}{z_3^{3+b+c}}$$

avec  $a, e \in \{0, 1\}$  et les  $\varrho^+$  et  $\varrho^-$  se calculent en fonction des différents paramètres.

Finalement considérons le cas où le polynôme  $\kappa_0 + \kappa_1 z_4 + \kappa_4 z_2^2$  a une racine double  $\gamma = -\frac{\kappa_1}{2\kappa_2}$ . Le feuilletage est alors décrit par la 1-forme

$$\frac{dZ_1}{Z_1} + \eta \frac{dz_4}{(z_4 - \gamma)^2} - 3 \frac{dz_4}{z_4 - \gamma}$$

avec

$$\eta = \frac{\kappa_3 - 3\kappa_2\gamma}{\kappa_2}$$

On obtient comme intégrale première

$$\frac{P(z_0, z_1, z_2, z_3, z_4)}{(z_4 - \gamma z_3)^3} \exp \left( \frac{\eta z_4}{\gamma z_3 - z_4} \right)$$

ou encore à conjugaison près

$$\frac{(z_1 z_3^2 + z_0 z_3 z_4 + e z_2 z_4^2 - a z_4^3)}{(z_4 - z_3)^3} \exp \left( \frac{v z_4}{z_3 - z_4} \right)$$

avec  $a, e \in \{0, 1\}$ .

3.3.3. Pour finir traitons le cas où

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad Z = \begin{pmatrix} a & b & c & \delta & e \\ f & -a & h & i & j \\ 0 & 0 & 0 & \ell & m \\ 0 & 0 & 0 & a & b \\ 0 & 0 & 0 & f & -a \end{pmatrix}$$

$$\text{avec } \begin{cases} a\ell = -fm \\ \delta m\ell = -m^2i + mj\ell + e\ell^2 \\ c\ell = -hm \\ b\ell^2 = -fm^2 \end{cases}$$

Il y a deux cas.

3.3.3.1. Maple donne l'algèbre  $\mathcal{L}$  engendrée par les champs

$$\begin{aligned} X &= (-3\varepsilon z_0 + \xi_1 z_1 + \xi_2 z_2 + \frac{(\delta\xi_1 - \xi_2 m)\ell^2 + 2m\varepsilon(\delta\ell + mi - \ell j)}{b\ell^2} z_3 + \xi_4 z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} \\ &\quad + (-2\varepsilon z_1 + \frac{2\xi_1 i + \xi_2 \ell - \varepsilon \delta}{2b} z_3) \frac{\partial}{\partial z_1} \\ &\quad + (-2\varepsilon z_2 + \frac{\ell\xi_1 + m\varepsilon}{b} z_3 + \xi_{14} z_4) \frac{\partial}{\partial z_2} + (-\varepsilon z_3 + \xi_1 z_4) \frac{\partial}{\partial z_3} \\ Z &= (bz_1 + \delta z_3 + \frac{m(\delta\ell - mi - \ell j)}{\ell^2} z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + iz_3 \frac{\partial}{\partial z_1} \\ &\quad + (\ell z_3 + mz_4) \frac{\partial}{\partial z_2} + bz_4 \frac{\partial}{\partial z_3}, \end{aligned}$$

et

$$\begin{pmatrix} 2\varepsilon & 0 \\ \frac{1}{2}(\varepsilon\delta - \xi_2\ell) & \varepsilon \end{pmatrix}$$

Les valeurs propres de cette matrice sont  $2\varepsilon$  et  $\varepsilon$  donc  $\tilde{\alpha} = \tilde{2}$ ; on remarque que  $\varepsilon \neq 0$ .

Le feuilletage associé à cette algèbre admet pour intégrale première

$$\frac{(z_2 z_4 - \frac{m}{b} z_3 z_4 - \frac{\ell}{2b} z_3^2 + \kappa z_4^2)^3}{(\xi_2 z_2 z_4^2 - \varepsilon z_0 z_4^2 + \varepsilon z_1 z_3 z_4 + \varsigma z_3 z_4^2 + (\frac{\delta\varepsilon - \ell\xi_2}{2b}) z_3^2 z_4 - \frac{i\varepsilon}{3b} z_3^3 + (\xi_2 \kappa - \varepsilon\nu) z_4^3)^2}$$

avec

$$\begin{aligned} \kappa &= -\frac{\xi_{14}}{2\varepsilon} + \frac{\xi_1 m}{2\varepsilon b}, \quad \varsigma = \frac{m\varepsilon(\delta\ell - mi - j\ell) - m\ell^2 \xi_2}{\ell^2 b} \\ \nu &= -\frac{1}{3\varepsilon} \left( \frac{\xi_2 \xi_{14}}{2\varepsilon} - \frac{\xi_1 \xi_2 m}{2b\varepsilon} + \xi_4 - \frac{\xi_1 m(\delta\ell - mi - \ell j)}{b\ell^2} \right) \end{aligned}$$

soit à conjugaison près

$$\frac{(z_2 z_4 - \zeta z_3^2)^3}{(z_0 z_4^2 + z_1 z_3 z_4 - \nu z_3^3)^2}$$

avec  $v, \zeta \in \{0, 1\}$ .

3.3.3.2. L'algèbre  $\mathcal{L}$  est engendrée par les champs

$$\begin{aligned} X &= (-4\varepsilon z_0 + \xi_1 z_1 + \xi_2 z_2 + \frac{\delta \xi_1 \ell - hm\xi_{14} + 3\varepsilon m(\delta - j) - \xi_2 m\ell}{b\ell} z_3 + \xi_4 z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} \\ &\quad + (-3\varepsilon z_0 + \frac{h(\ell \xi_1 + m\varepsilon)}{b\ell} z_2 + \frac{\xi_2 \ell + h\xi_{14} - 2\varepsilon \delta}{2b} z_3) \frac{\partial}{\partial z_1} \\ &\quad + (-2\varepsilon z_2 + \frac{\ell \xi_1 + m\varepsilon}{b} z_3 + \xi_{14} z_4) \frac{\partial}{\partial z_2} + (-\varepsilon z_3 + \xi_1 z_4) \frac{\partial}{\partial z_3} \\ Z &= (bz_1 - \frac{hm}{\ell} z_2 + \delta z_3 + \frac{m(\delta - j)}{\ell} z_4) \frac{\partial}{\partial z_0} + hz_2 \frac{\partial}{\partial z_1} \\ &\quad + (\ell z_3 + mz_4) \frac{\partial}{\partial z_2} + bz_4 \frac{\partial}{\partial z_3} \end{aligned}$$

et

$$\begin{pmatrix} 3\varepsilon & 0 \\ \frac{(b\ell(h\xi_{14} - \xi_2 \ell)) + 2b\ell\varepsilon\delta - 2hm(\varepsilon m + \ell \xi_1)}{2b\ell} & \varepsilon \end{pmatrix}$$

On note que  $\tilde{\alpha} = \tilde{3}$ , que  $\varepsilon \neq 0$  et que  $b\ell \neq 0$  (sinon  $\tilde{\alpha} = \tilde{0}$ ).

Le feuilletage associé à cette algèbre admet pour intégrale première

$$\frac{(z_2 z_4 - \ell P + \eta z_4^2)^2}{2\varepsilon (\zeta z_3 z_4^3 - z_0 z_4^3 - h z_2 z_4 P + z_1 z_3 z_4^2 + 2\tau \rho^2 \ell z_3^2 z_4^2 + \vartheta z_3^3 z_4 + \frac{h\ell}{8b^2} z_3^4) + \kappa z_4^2 (z_2 z_4 - \ell P + \eta z_4^2)}$$

avec

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{1}{4\varepsilon} \left( -\frac{1}{2\varepsilon} \left( \xi_2 + \frac{\xi_1 hm}{b\ell} \right) \left( \frac{\xi_1 m}{b} - \xi_{14} \right) + \xi_4 - \frac{\xi_1 m(\delta - j)}{b\ell} \right), \\ \kappa &= \xi_2 + \frac{\xi_1 hm}{b\ell}, \quad \eta = \frac{1}{2\varepsilon} \left( \frac{\xi_1 m}{b} - \xi_{14} \right), \quad \varsigma = \frac{\ell \varepsilon h}{2b} \\ \tau &= m^2 h + b\ell \delta, \quad \rho = \frac{1}{2b\ell}, \quad \vartheta = \frac{mh}{2b^2}, \\ \zeta &= 2m\rho(\delta - j) \text{ et } P = \rho(2mz_4 + \ell z_3)z_3 \end{aligned}$$

Ce qui conduit à conjugaison près à

$$\frac{(z_2 z_4 + \Upsilon_1 z_3^2)^2}{z_0 z_4^3 + z_1 z_3 z_4^2 + \Upsilon_2 z_2 z_3^2 z_4 + v z_3^3 z_4 + \Upsilon_3 z_3^4}$$

où  $\Upsilon_i \in \{0, 1\}$ .



THÉORÈME 6.4. (Maple) Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$ . Si  $\mathcal{L}$  admet pour présentation  $\{[X, Y] = Y, [X, Z] = \alpha Z, [Y, Z] = 0\}$ ,  $\alpha \neq 0$ , alors le feuilletage  $\mathcal{F}$  possède un intégrale première de l'un des types :

$$\begin{aligned}
 & \frac{\left(z_0 z_4^3 - \frac{z_2^2 z_4^2}{2} - z_3 z_4^2 + z_2 z_3^2 z_4 - \frac{z_3^4}{4}\right)^3}{\left(z_1 z_4^2 - z_2 z_3 z_4 + \frac{z_3^3}{3}\right)^4} \\
 & \frac{\left(z_1 z_4^2 - z_2 z_3 z_4 + \frac{z_3^3}{3}\right)^4}{\left(z_0 z_4^3 - (2z_1 z_3 + z_2^2) z_4^2 - \frac{z_3^4}{2}\right)^3} \\
 & \frac{z_4(z_0 z_4^2 + z_1 z_3 z_4 + z_2^2 z_4 + a z_3^3)}{z_3^4} \\
 & \frac{z_4^{3\kappa-\lambda} z_3^\lambda}{(z_1 z_4^2 + z_2 z_3 z_4 + z_2^2 z_3 + z_0^2 z_4)^\kappa} \\
 & \left(\frac{z_3}{z_4}\right)^\kappa \exp\left(\frac{z_1 z_4^2 + z_0 z_3 z_4 + z_2^2 z_3}{z_4^3}\right) \\
 & \frac{z_3^{\kappa+\lambda} z_4^{2\lambda-\kappa}}{(z_1 z_4^2 + z_0 z_3 z_4 + z_2^2 z_3)^\lambda} \\
 & \left(\frac{z_3}{z_4}\right)^\kappa \exp\left(\frac{z_1 z_4^2 + z_0 z_3 z_4 + z_2^2 z_3}{z_3^2 z_4}\right) \\
 & \frac{\left((z_0 - \gamma^+ z_1) z_4 + (\gamma^+ c - d) z_3^2 - \frac{z_2^2}{2} + \gamma^+ z_2 z_3\right)^{\vartheta^+} \left((z_0 - \gamma^- z_1) z_4 + (\gamma^- c - d) z_3^2 - \frac{z_2^2}{2} + \gamma^- z_2 z_3\right)^{\vartheta^-}}{z_4^2} \\
 & \frac{(z_0 - z_1) z_4 + c z_2 z_3 - \frac{z_2^2}{2} + v z_3^2}{z_4^2} \exp\left(\frac{\zeta\left(z_0 z_4 - 2g\delta z_3^2 - \frac{z_2^2}{2}\right)}{(z_0 - z_1) z_4 + c z_2 z_3 - \frac{z_2^2}{2} + v z_3^2}\right) \\
 & z_3^{\lambda_3} z_4^{\lambda_4} Q^{\lambda_2}, \text{ ou } Q \text{ est une certaine cubique, et ses dégénérescences (cf 3.2.5.)} \\
 & \frac{z_4^\kappa (z_0 z_3^2 + z_1 z_2 z_3 + z_2^3)^{\lambda-\kappa}}{z_3^{3\lambda-2\kappa}} \\
 & \left(\frac{z_4}{z_3}\right)^\kappa \exp\left(\frac{z_0 z_3^2 + z_1 z_2 z_3 + z_2^3}{z_3^2 z_4}\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{z_0 z_3^2 + z_1 z_2 z_3 + z_2^3}{z_3^3} \exp\left(\frac{z_4}{z_3}\right) \\
& \frac{(z_1 z_3^2 + z_0 z_3 z_4 + e z_2 z_4^2 - a z_4^3)}{(z_4 - z_3)^3} \exp\left(\frac{v z_4}{z_3 - z_4}\right) \\
& \frac{(z_1 z_3^2 + z_0 z_3 z_4 + e z_2 z_4^2 - a z_4^3) (z_4 - \varrho^- z_3)^\kappa (z_4 - \varrho^+ z_3)^\lambda}{z_3^{3+\kappa+\lambda}} \\
& \frac{(z_2 z_4 - a z_3^2)^3}{(z_0 z_4^2 + z_1 z_3 z_4 - e z_3^3)^2} \text{ où } \xi, v \in \{0, 1\} \\
& \frac{(z_2 z_4 + \Upsilon_1 z_3^2)^2}{z_0 z_4^3 + z_1 z_3 z_4^2 + \Upsilon_2 z_2 z_3^2 z_4 + v z_3^3 z_4 + \Upsilon_3 z_3^4}
\end{aligned}$$

où  $a, e, \Upsilon_i \in \{0, 1\}$  et les autres paramètres sont des nombres complexes.

#### 4. L'algèbre $\mathcal{L}$ a pour présentation $\{[X, Y] = [X, Z] = 0, [Y, Z] = Y\}$ .

Comme précédemment on définit les combinaisons linéaires permises par les combinaisons linéaires de  $X, Y$  et  $Z$  avec  $X, Y, Z$  et  $R$  qui respectent la structure de l'algèbre  $\mathcal{L}$ .

La résolubilité de  $\mathcal{L}$  et l'égalité  $[Y, Z] = Y$  assurent que  $Y$  est nilpotent. Les matrices  $X$  et  $Y$  commutent d'où l'existence d'une base dans laquelle on peut jordaniser  $X$  et  $Y$ ; on obtient modulo  $R$  les configurations suivantes :

$$\begin{aligned}
X &= \begin{pmatrix} \nu_0 & \beta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \nu_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \nu_2 \end{pmatrix} \text{ et } Y = \begin{pmatrix} 0 & \varepsilon & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
\\
X &= \begin{pmatrix} \nu_0 & \beta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \nu_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta & \vartheta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \delta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } Y = \begin{pmatrix} 0 & \varepsilon & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \phi & \eta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
X &= \begin{pmatrix} \nu_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \nu_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varepsilon & \delta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } Y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vartheta & \beta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \vartheta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
X &= \begin{pmatrix} \nu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta & \vartheta & \phi \\ 0 & 0 & 0 & \eta & \vartheta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \eta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } Y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta & \delta & \varepsilon \\ 0 & 0 & 0 & \beta & \delta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
X &= \begin{pmatrix} 0 & \eta & \vartheta & \phi & \nu \\ 0 & 0 & \eta & \vartheta & \phi \\ 0 & 0 & 0 & \eta & \vartheta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \eta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } Y = \begin{pmatrix} 0 & \lambda & \beta & \delta & \varepsilon \\ 0 & 0 & \lambda & \beta & \delta \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & \beta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

On cherche alors  $Z$  tel que  $[X, Z] = 0$  et  $[Y, Z] = Y$ , on obtient les sept configurations suivantes que l'on traite au cas par cas. Certaines configurations s'avèrent redondantes comme nous le verrons; comme cela ne se constate qu'à posteriori nous les avons laissés.

4.1. D'après Maple, les champs  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  s'écrivent

$$\begin{aligned}
X &= z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_1 \frac{\partial}{\partial z_1}, \quad Y = \varepsilon z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2}, \quad \varepsilon \neq 0 \\
Z &= (\xi_0 z_0 + \xi_1 z_1) \frac{\partial}{\partial z_0} + (\xi_0 - 1) z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + \xi_2 z_3 \frac{\partial}{\partial z_3} \\
&\quad + ((\xi_2 + 1) z_2 + \xi_3 z_3 + \xi_4 z_4) \frac{\partial}{\partial z_2} + (\xi_5 z_3 + \xi_6 z_4) \frac{\partial}{\partial z_4}
\end{aligned}$$

Le feuilletage  $\mathcal{F}$  associé à cette algèbre est décrit dans la carte affine  $z_3 = 1$  par la 1-forme  $\omega$  donnée par

$$\begin{aligned}
&((\xi_2 - \xi_6) z_4 - \xi_5)(z_1 dz_0 - z_0 dz_1) + \varepsilon(\xi_5 + (\xi_6 - \xi_2) z_4) z_1^2 dz_2 \\
&\quad + (z_0 + (\xi_1 - \varepsilon \xi_3) z_1 - \varepsilon z_1 z_2 - \varepsilon \xi_4 z_1 z_4) z_1 dz_4
\end{aligned}$$

Supposons que  $\lambda = \xi_6 - \xi_2 \neq 0$ ; on peut résorber le terme  $\xi_5$  et, comme  $\varepsilon \neq 0$ , par une homothétie on se ramène à

$$\lambda(z_0 dz_1 - z_1 dz_0) z_4 + \lambda z_1^2 z_4 dz_2 + (z_0 + \xi'_1 z_1 - z_1 z_2 - \xi_4 z_1 z_4) dz_4$$

On procède ici par éclatement Posons  $z_0 = t z_1$ ,  $\xi'_1 = \xi_1 - \xi_3 - \frac{\xi_4 \xi_5}{\lambda}$  puis  $T = t - z_2 + \xi'_1$ ; on obtient

$$z_1^2 ((T - \xi_4 z_4) dz_4 - \lambda z_4 dT)$$

qui a pour facteur intégrant

$$z_1^2 z_4 ((1 - \lambda)T - \xi_4 z_4)$$

Si  $\lambda \neq 1$ , le feuilletage admet pour intégrale première

$$\frac{z_1^\lambda z_3^{\lambda-1} z_4}{((1 - \lambda)(z_0 z_3 - z_1 z_2 + \xi_1' z_1 z_3) - \xi_4 z_1 z_4)^\lambda}$$

et

$$\frac{z_4}{z_3} \exp \left( \frac{z_0 z_3 - z_1 z_2 + \xi_1' z_1 z_3}{z_1 z_4} \right)$$

sinon.

Ce qui donne à conjugaison près

$$\frac{z_1^\lambda z_3^{\lambda-1} z_4}{(z_0 z_3 + z_1 z_2)^\lambda}$$

si  $\lambda \neq 1$  et

$$\frac{z_4}{z_3} \exp \left( \frac{z_0 z_3 + z_1 z_2}{z_1 z_4} \right)$$

sinon.

Supposons que  $\lambda = 0$ ; on remarque que si  $\xi_5 = 0$ , le degré du feuilletage chute. La 1-forme  $\omega$  s'écrit alors

$$-\xi_5(z_1 dz_0 - z_0 dz_1) + \varepsilon \xi_5 z_1^2 dz_2 \\ + (z_0 + (\xi_1 - \varepsilon \xi_3)z_1 - \varepsilon z_1 z_2 - \varepsilon \xi_4 z_1 z_4) z_1 dz_4$$

Si  $\xi_4 \neq 0$ , posons  $t = \frac{z_0}{z_1}$ ,  $T = -t + \varepsilon z_2$  et  $Z_4 = z_4 - \frac{\xi_1 - \varepsilon \xi_3}{\varepsilon \xi_4}$ ; quitte à diviser par  $z_1^2$ , on a

$$\omega = \xi_5 dT - (T + \varepsilon \xi_4 Z_4) dZ_4$$

i.e.

$$\frac{dT}{dZ_4} = \frac{T + \varepsilon \xi_4 Z_4}{\xi_5}$$

Ainsi  $T = C \exp z_4 - \varepsilon \xi_4 (Z_4 + \xi_5)$  et

$$C = (T + \varepsilon \xi_4 (Z_4 + \xi_5)) \exp(-z_4)$$

est une intégrale première du feuilletage. Finalement on obtient

$$\left( \frac{\varepsilon z_1 z_2 - z_0 z_3 + \varepsilon \xi_4 z_1 z_4 - \varepsilon \xi_4 (\xi_5 - \nu) z_1 z_3}{z_1 z_3} \right) \exp \left( \frac{-z_4 + \nu z_3}{z_3} \right)$$

où

$$\nu = \frac{\xi_1 - \varepsilon \xi_3}{\varepsilon \xi_4}$$

soit à conjugaison près

$$\left( \frac{z_1 z_2 + z_0 z_3}{z_1 z_3} \right) \exp \left( \frac{z_4}{z_3} \right)$$

Pour  $\xi_4 = 0$ , on trouve l'intégrale première

$$\frac{z_0 z_3 - \varepsilon z_1 z_2 - (\xi_1 - \varepsilon \xi_3) z_1 z_3}{z_1 z_3} \exp \left( -\frac{z_4}{\xi_5 z_3} \right)$$

soit à conjugaison près

$$\frac{z_0 z_3 + z_1 z_2}{z_1 z_3} \exp \left( \frac{z_4}{z_3} \right)$$

On constate que les intégrales premières trouvées dans les cas  $\xi_4 \neq 0$  et  $\xi_4 = 0$  sont conjuguées.

4.2. Le deuxième cas donné par Maple est le suivant

$$X = (z_0 + \beta z_1) \frac{\partial}{\partial z_0} + z_1 \frac{\partial}{\partial z_1}, \quad Y = (z_3 + (\xi_9 - \xi_3) z_4) \frac{\partial}{\partial z_2} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_3}$$

$$Z = \xi_1 z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + (z_2 + \xi_3 z_3 + \xi_4 z_4) \frac{\partial}{\partial z_2} + \xi_3 z_4 \frac{\partial}{\partial z_3} - z_4 \frac{\partial}{\partial z_4}$$

Posons

$$Z_2 = \frac{2z_2 - z_3^2 + 2(\xi_3 - \xi_9)z_3 + \xi_9 \xi_3 + \xi_4 - \xi_9^2}{2}$$

alors la 1-forme annulant les champs  $X, Y, Z$  et  $R$  s'écrit

$$\frac{z_1 dz_0 - (z_0 + \beta z_1) dz_1}{z_1^2} - \frac{\xi_1}{2} \frac{dZ_2}{Z_2}$$

ce qui conduit à l'intégrale première

$$\frac{z_1^{2\beta} \left( z_2 z_4 - \frac{z_3^2}{2} + (\xi_3 - \xi_9) z_3 z_4 + (\xi_3(\xi_3 - \xi_9) + \xi_4) z_4^2 \right)^{\xi_1}}{z_4^{2(\beta + \xi_1)}} \exp \left( \frac{2z_0}{z_1} \right)$$

soit à conjugaison près

$$\frac{z_1^{2\beta} \left( z_2 z_4 - \frac{z_3^2}{2} \right)^{\xi_1}}{z_4^{2(\beta + \xi_1)}} \exp \left( \frac{z_0}{z_1} \right)$$

4.3. Comme troisième cas on a

$$X = z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_1 \frac{\partial}{\partial z_1}, \quad Y = (z_3 - \xi_3 z_4) \frac{\partial}{\partial z_2} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad R \text{ et}$$

$$Z = (\xi_0 z_0 + \xi_6 z_1) \frac{\partial}{\partial z_1} + (2z_2 + \xi_3 z_3) \frac{\partial}{\partial z_2} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_3}$$

ou bien si  $\xi_0 = \xi_6$

$$X = z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_1 \frac{\partial}{\partial z_1}, \quad Y = (z_3 - \xi_3 z_4) \frac{\partial}{\partial z_2} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_3}, \quad R \text{ et}$$

$$Z = (\xi_0 z_0 + z_1) \frac{\partial}{\partial z_0} + \xi_0 z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + (2z_2 + \xi_3 z_3) \frac{\partial}{\partial z_2} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_3}$$

Dans le premier cas, après étude dans la carte affine  $z_4 = 1$ , on trouve l'intégrale première

$$\left( \frac{z_0}{z_1} \right)^{\frac{2}{\xi_6 - \xi_0}} \left( \frac{z_2 z_4 - \frac{z_3^2}{2} + \xi_3 z_3 z_4}{z_4^2} \right)$$

qui est conjuguée à

$$\left( \frac{z_0}{z_1} \right)^{\frac{2}{\xi_6 - \xi_0}} \left( \frac{z_2 z_4 - z_3^2}{z_4^2} \right)$$

et dans le second cas

$$\frac{z_2 z_4 - \frac{z_3^2}{2} + \xi_3 z_3 z_4}{z_4^2} \exp \left( -\frac{2z_0}{z_1} \right)$$

qui se ramène à

$$\frac{z_2 z_4 - z_3^2}{z_4^2} \exp \left( \frac{z_0}{z_1} \right)$$

C'est un cas particulier du 4.2 ( $\beta = 0$ ,  $\xi_1 = 1$ )

4.4. Les champs  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  s'écrivent dans le quatrième cas :

$$X = z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_1 \frac{\partial}{\partial z_1}, \quad Y = z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_2}$$

$$Z = -z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + (z_2 + \xi_3 z_3) \frac{\partial}{\partial z_2} + (\xi_8 z_3 + \xi_9 z_4) \frac{\partial}{\partial z_3}$$

La 1-forme  $\omega$  annulant ces champs s'écrit dans la carte affine  $z_4 = 1$

$$(\xi_8 z_3 + \xi_9)(z_1 dz_0 - z_0 dz_1 - z_1^2 dz_2) - z_1(z_0 - z_1(z_2 + \xi_3 z_3 z_1)) dz_3$$

autrement dit

$$d\left(\frac{z_0}{z_1} - z_2\right) - \left(\frac{z_0}{z_1} - z_2 - \xi_3 z_3\right) \frac{dz_3}{\xi_8 z_3 + \xi_9}$$

Posons  $u = \frac{z_0}{z_1} - z_2$ ; alors à multiplication près  $\omega$  est du type

$$(\xi_8 z_3 + \xi_9)du + (u - \xi_3 z_3)dz_3$$

Notons, si  $\xi_8 \neq 0$  :

$$\kappa = \frac{\xi_9}{\xi_8}, \quad Z_3 = z_3 + \kappa \text{ et } U = u - \xi_3 \kappa$$

Alors le feuilletage est décrit par

$$\xi_8 Z_3 dU + (U - \xi_3 Z_3) dZ_3$$

et admet pour intégrale première

$$Z_3((\xi_8) + 1)U - \xi_3 Z_3)^{\xi_8}$$

si  $\xi_8 \neq -1$  et

$$Z_3^{\xi_3} \exp\left(\frac{U}{Z_3}\right)$$

sinon.

On obtient dans les coordonnées initiales l'intégrale première

$$\frac{(z_3 + \kappa z_4)((\xi_8 + 1)(z_0 z_4 - z_1 z_2 + \xi_3 \kappa z_1 z_4) - \xi_3(z_3 z_4 + \kappa z_4^2))^{\xi_8}}{z_1^{\xi_8} z_4^{1+\xi_8}}$$

qui est conjuguée à

$$\frac{z_3(z_0 z_4 - z_1 z_2)^{\xi_8}}{z_1^{\xi_8} z_4^{1+\xi_8}}$$

si  $\xi_8 \neq 1$ , et

$$\left(\frac{z_3 + \kappa z_4}{z_4}\right) \exp\left(\frac{z_0 z_4 - z_1 z_2 - \xi_3 \kappa z_1 z_4}{z_1(z_3 + \kappa z_4)}\right)$$

que l'on conjugue à

$$\left(\frac{z_3}{z_4}\right) \exp\left(\frac{z_0 z_4 - z_1 z_2}{z_1 z_3}\right)$$

sinon. On remarque que cette dernière intégrale première se ramène à celle obtenue en 4.1. pour  $\lambda \neq 1$ .

Lorsque  $\xi_8 = 0$ , la 1-forme  $\omega$  s'écrit

$$\xi_9 du + (u - \xi_3 z_3) dz_3$$

et a pour intégrale première

$$(u - \xi_3 z_3 + \xi_3 \xi_9) \exp\left(\frac{z_3}{\xi_9}\right)$$

ce qui conduit à

$$\frac{z_0 z_4 - z_1 z_2 - \xi_3 z_1 z_3 + \xi_3 \xi_9 z_1 z_4}{z_1 z_4} \exp\left(\frac{z_3}{\xi_9 z_4}\right)$$

que l'on transforme en :

$$\frac{z_0 z_4 - z_1 z_2}{z_1 z_4} \exp\left(\frac{z_3}{z_4}\right)$$

Cette intégrale première est encore conjuguée à celle obtenue en 4.1. pour  $\lambda = 0$ .

4.5. Grâce à Maple, on obtient pour le cinquième cas

$$\begin{aligned} X &= z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_1 \frac{\partial}{\partial z_1}, & Y &= z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_3} \\ Z &= \xi_1 z_1 \frac{\partial}{\partial z_0} - z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} + 2z_2 \frac{\partial}{\partial z_2} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_3} \end{aligned}$$

La 1-forme qui annule ces champs s'écrit dans la carte affine  $z_4 = 1$

$$(2z_2 - z_3^2)(z_1 dz_0 - z_0 dz_1 - z_1^2 dz_3) + z_1(z_0 - \xi_1 z_1 - z_1 z_3)(dz_2 - z_3 dz_3)$$

soit à coefficient multiplicatif près

$$2 \frac{d\left(\frac{z_0}{z_1} - \xi_1 - z_3\right)}{\frac{z_0}{z_1} - \xi_1 - z_3} - \frac{d(2z_2 - z_3^2)}{2z_2 - z_3^2}$$

On constate que

$$\frac{(z_0 z_4 - \xi_1 z_1 z_4 - z_1 z_3)^2}{z_1^2 (2z_2 z_4 - z_3^2)}$$

est une intégrale première rationnelle du feuilletage de  $\mathbf{CP}(4)$  associé, ce qui donne à conjugaison près

$$\frac{(z_0 z_4 - z_1 z_3)^2}{z_1^2 (z_2 z_4 - z_3^2)}$$

4.6. D'après Maple l'avant dernière possibilité est la suivante :

$$\begin{aligned} X &= z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + \nu z_1 \frac{\partial}{\partial z_1}, & Y &= (z_3 + \kappa z_4) \frac{\partial}{\partial z_2} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_3}, & R &\text{ et} \\ Z &= (\xi_6 - \xi_1 - \nu(\xi_0 - \xi_1)) z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} \end{aligned}$$



$$+(2z_2 - \kappa z_3 + (\xi_4 - \xi_9 \kappa)z_4) \frac{\partial}{\partial z_2} + z_3 \frac{\partial}{\partial z_3}$$

où

$$\kappa = \xi_9 - \xi_3$$

La 1-forme annulant les champs  $X, Y, Z$  et  $R$  s'écrit dans la carte affine  $z_4 = 1$

$$(\beta - 2\kappa z_3 - z_3^2 + 2z_2)(\nu z_1 dz_0 - z_0 dz_1) + \gamma z_0 z_1 (dz_2 - \kappa - z_3) dz_3$$

où

$$\beta = \xi_4 - \xi_9 \kappa \text{ et } \gamma = \xi_6 + (\nu - 1)\xi_1 - \nu \xi_0$$

Cette 1-forme s'écrit aussi

$$\nu \frac{dz_0}{z_0} - \frac{dz_1}{z_1} + \frac{\gamma}{2} \frac{d(\beta + 2z_2 - 2\kappa z_3 - z_3^2)}{\beta + 2z_2 - 2\kappa z_3 - z_3^2}$$

Le  $\mathcal{L}$ -feuilletage décrit par cette forme admet donc pour intégrale première

$$\frac{z_0^{2\nu} (\beta z_4^2 + 2z_2 z_4 - 2\kappa z_3 z_4 - z_3^2)^\gamma}{z_4^{2(\gamma+\nu-1)} z_1^2}$$

que l'on conjugue à

$$\frac{z_0^{2\nu} (z_2 z_4 - z_3^2)^\gamma}{z_4^{2(\gamma+\nu-1)} z_1^2}$$

4.7. Enfin la dernière possibilité est celle où les champs  $X, Y$  et  $Z$  s'écrivent

$$\begin{aligned} X &= z_0 \frac{\partial}{\partial z_0} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_1}, \quad Y = (z_3 + \varepsilon z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} + z_4 \frac{\partial}{\partial z_2}, \quad R \text{ et} \\ Z &= ((\xi_9 + \varepsilon)z_2 + (\xi_8 - \xi_9)z_3 + (\xi_9 - \xi_0 + \xi_6 - \varepsilon \xi_9)z_4) \frac{\partial}{\partial z_1} \\ &\quad + (z_2 + \xi_3 z_3) \frac{\partial}{\partial z_2} + (-z_3 + \xi_9 z_4) \frac{\partial}{\partial z_3} \end{aligned}$$

La 1-forme annulant les champs  $X, Y, Z$  et  $R$  s'écrit dans la carte affine  $z_4 = 1$

$$\begin{aligned} &(z_3 - \xi_9)(dz_0 - z_0 dz_1 + z_0(\varepsilon + z_3))dz_2 \\ &+ (z_0(z_2(z_3 - \xi_9) + z_3((z_3 + \varepsilon)\xi_3 - \xi_8 + \xi_9) - \xi_9 + \varepsilon \xi_9 + \xi_0 \xi_6)) dz_3 \end{aligned}$$

qui admet comme intégrale première

$$\frac{z_0(z_3 - \xi_{18} z_4)^\zeta}{z_4^{1+\zeta}} \exp \left( \frac{-z_1 z_4 + \varepsilon z_2 z_4 + z_2 z_3 + \frac{\xi_3}{2} z_3^2 + \nu z_3 z_4}{z_4^2} \right)$$

où

$$\zeta = ((\xi_3 + 1)(\xi_9 + \varepsilon) - \xi_8)\xi_9 - \xi_9 + \xi_0\xi_6$$

et

$$v = ((\varepsilon + \xi_9)\xi_3 - \xi_8 + \xi_9)$$

soit à conjugaison près

$$\frac{z_0(z_3 - z_4)^\zeta}{z_4^{1+\zeta}} \exp\left(\frac{z_1z_4 + z_2z_3}{z_4^2}\right)$$

**THÉORÈME 6.5.** (*Maple*) Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$ . Si  $\mathcal{L}$  admet pour présentation  $\{[X, Y] = 0, [X, Z] = 0, [Y, Z] = Y\}$ , alors le feuilletage  $\mathcal{F}$  possède à conjugaison près l'une des intégrales premières suivantes :

$$\begin{aligned} & \frac{z_1^\lambda z_3^{\lambda-1} z_4}{(z_0 z_3 + z_1 z_2)^\lambda} \\ & \frac{z_4}{z_3} \exp\left(\frac{z_0 z_3 + z_1 z_2}{z_1 z_4}\right) \\ & \frac{z_0 z_3 + z_1 z_2}{z_1 z_3} \exp\left(\frac{z_4}{z_3}\right) \\ & \frac{z_1^{2\lambda} \left(z_2 z_4 - \frac{z_3^2}{2}\right)^\kappa}{z_4^{2(\lambda+\kappa)}} \exp\left(\frac{z_0}{z_1}\right) \\ & \left(\frac{z_0}{z_1}\right)^\kappa \left(\frac{z_2 z_4 - z_3^2}{z_4^2}\right) \\ & \frac{z_3(z_0 z_4 - z_1 z_2)^\kappa}{z_1^\kappa z_4^{\kappa+1}} \\ & \frac{(z_0 z_4 - z_1 z_3)^2}{z_1^2 (z_2 z_4 - z_3^2)} \\ & \frac{z_0^{2\kappa} (z_2 z_4 - z_3^2)^\lambda}{z_4^{2(\lambda+\kappa-1)} z_1^2} \\ & \frac{z_0(z_3 - z_4)^\kappa}{z_4^{1+\kappa}} \exp\left(\frac{z_1 z_4 + z_2 z_3}{z_4^2}\right) \end{aligned}$$

où  $\kappa$  et  $\lambda$  désignent des nombres complexes.

**5. L'algèbre  $\mathcal{L}$  a pour présentation  $\{[X, Y] = [X, Z] = 0, [Y, Z] = X\}$ .**

On se propose de vérifier le :

**THÉORÈME 6.6.** *Il n'existe pas de  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$  associé à l'algèbre  $\{[X, Y] = 0, [X, Z] = 0, [Y, Z] = X\}$ .*

La démonstration se fait en deux étapes, chacune correspondant à l'un des lemmes qui suivent.

L'égalité  $[Y, Z] = X$  implique que  $X$  est nilpotente ; par jordanisation  $X$  s'écrit

$$\begin{pmatrix} 0 & \varepsilon_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varepsilon_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

où  $\varepsilon_i \in \{0, 1\}$ . Notons

$$X_4 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

On a le :

**LEMME 6.7.** *Si  $X$  n'est pas conjugué à  $X_4$ , alors l'algèbre  $\mathcal{L}$  n'est pas associée à un feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$ .*

**DÉMONSTRATION.** Si  $X$  est de rang 4, comme  $Y$  et  $Z$  commutent avec  $X$ , les matrices  $Y$  et  $Z$  sont de la forme

$$\begin{pmatrix} \nu & \kappa & \beta & \gamma & \delta \\ 0 & \nu & \kappa & \beta & \gamma \\ 0 & 0 & \nu & \kappa & \beta \\ 0 & 0 & 0 & \nu & \kappa \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \nu \end{pmatrix}$$

Mais alors  $[Y, Z] = 0$ , ce qui est exclu.

Supposons que  $X$  soit de rang 3 ; alors  $X$  est du type

$$X_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ ou } X_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Commençons par supposer que  $X$  est du type  $X_1$  ;  $Y$  et  $Z$  commutent à  $X$  donc s'écrivent quitte à soustraire un multiple de  $X$

$$\begin{pmatrix} \kappa & 0 & \beta & * & * \\ 0 & \kappa & 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & \kappa & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 0 & * & * \end{pmatrix}$$

Mais alors  $[Y, Z]$  est de la forme

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & * & 0 \end{pmatrix}$$

et ne peut donc pas être égal à  $X$ .

Finalement supposons que  $X$  soit du type  $X_2$  ;  $Y$  et  $Z$  commutent à  $X$  donc s'écrivent respectivement quitte à soustraire un multiple de  $X$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & \xi_1 & \xi_2 & \xi_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \xi_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \xi_4 & \xi_5 & \xi_6 & \xi_7 \\ 0 & 0 & \xi_4 & 0 & \xi_6 \end{pmatrix} \text{ et } \begin{pmatrix} 0 & 0 & \kappa_1 & \kappa_2 & \kappa_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \kappa_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \kappa_4 & \kappa_5 & \kappa_6 & \kappa_7 \\ 0 & 0 & \kappa_4 & 0 & \kappa_6 \end{pmatrix}$$

Alors la condition  $[Y, Z] = X$  ne peut être satisfaite.

Si  $X$  est de rang 2, alors  $X$  est de la forme  $X_4$  ou

$$X_3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Si  $X$  est du type  $X_3$ ; comme  $Y$  et  $Z$  commutent avec  $X$ , ils s'écrivent quitte à soustraire un multiple de  $X$

$$\begin{pmatrix} \kappa & 0 & * & * & * \\ 0 & \kappa & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \kappa & 0 & 0 \\ 0 & 0 & * & * & * \\ 0 & 0 & * & * & * \end{pmatrix}$$

Mais alors  $[Y, Z]$  est de la forme

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & * & * & * \\ 0 & 0 & * & * & * \end{pmatrix}$$

et ne peut donc pas être égal à  $X$ .

Si  $X$  est de rang 1, alors le feuilletage associée à  $\mathcal{L}$  est en fait un pull-back.  $\square$

Reste donc à traiter le cas où  $X = X_4$ ; les matrices  $X$  et  $Y$  commutent donc sont simultanément jordanisables. Il nous reste parmi les configurations rencontrées en 4. la suivante :

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } Y = \begin{pmatrix} \nu_0 & \beta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \nu_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \nu_2 \end{pmatrix}$$

LEMME 6.8. *Cette configuration ne génère pas un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$ .*

DÉMONSTRATION. A combinaisons linéaires permises près  $Y$  et  $Z$  s'écrivent

$$\begin{pmatrix} \nu_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \nu_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \nu_2 \end{pmatrix} \text{ et } \begin{pmatrix} 0 & 0 & \zeta_2 & \zeta_3 & \zeta_4 \\ \zeta_5 & \zeta_6 & \zeta_7 & \zeta_8 & \zeta_9 \\ \zeta_{10} & \zeta_{11} & \zeta_{12} & \zeta_{13} & \zeta_{14} \\ \zeta_{15} & \zeta_{16} & \zeta_{17} & \zeta_{18} & \zeta_{19} \\ \zeta_{20} & \zeta_{21} & \zeta_{22} & \zeta_{23} & \zeta_{24} \end{pmatrix}$$

L'égalité  $[Y, Z] - X = 0$  s'écrit alors

$$\begin{pmatrix} 0 & -1 & -\nu_0\zeta_2 & \zeta_2\delta - \nu_0\zeta_3 & \zeta_4(\nu_2 - \nu_0) \\ 0 & 0 & -\nu_0\zeta_7 & \zeta_7\delta - \nu_0\zeta_8 & \zeta_9(\nu_2 - \nu_0) \\ \zeta_{10}\nu_0 - \delta\zeta_{15} & \zeta_{11}\nu_0 - \delta\zeta_{16} & -\zeta_{17}\delta & \delta(\zeta_{12} - \zeta_{18}) - 1 & \zeta_{14}\nu_2 - \delta\zeta_{19} \\ \zeta_{15}\nu_0 & \zeta_{16}\nu_0 & 0 & \zeta_{17}\delta & \zeta_{19}\nu_2 \\ \zeta_{20}(\nu_0 - \nu_2) & \zeta_{21}(\nu_0 - \nu_2) & -\nu_2\zeta_{22} & \zeta_{22}\delta - \nu_2\zeta_{23} & 0 \end{pmatrix}$$

ce qui est absurde (première ligne, 2ème colonne).  $\square$

### 6. L'algèbre $\mathcal{L}$ a pour présentation

$$\{[X, Y] = Y, [X, Z] = Y + Z, [Y, Z] = 0\}.$$

De même on a le :

**THÉORÈME 6.9.** *Il n'existe pas de  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$  associé à l'algèbre décrite par  $\{[X, Y] = Y, [X, Z] = Y + Z, [Y, Z] = 0\}$ .*

La démonstration se fait en deux étapes, chacune correspondant à l'un des lemmes qui suivent.

La résolubilité de  $\mathcal{L}$  et l'égalité  $[X, Y] = Y$  implique que  $Y$  est nilpotente, alors par jordanisation  $Y$  s'écrit

$$\begin{pmatrix} 0 & \varepsilon_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varepsilon_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

où  $\varepsilon_i \in \{0, 1\}$ . Notons

$$Y_4 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

on a

**LEMME 6.10.** *Si  $Y$  n'est pas conjugué à  $Y_4$ , alors l'algèbre  $\mathcal{L}$  n'est pas associée à un feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$ .*

DÉMONSTRATION. Supposons que  $Y$  soit de rang 4. Comme  $Z$  commute à  $Y$ , la matrice  $Z$  est quitte à soustraire  $Y$  de la forme

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & \beta & \gamma & \delta \\ 0 & 0 & 0 & \beta & \gamma \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

et l'égalité  $[X, Y] = Y$  implique que

$$X = \begin{pmatrix} \kappa' & \beta' & \gamma' & \delta' & \varepsilon' \\ 0 & \kappa' + 1 & \beta' & \gamma' & \delta' \\ 0 & 0 & \kappa' + 2 & \beta' & \gamma' \\ 0 & 0 & 0 & \kappa' + 3 & \beta' \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \kappa' + 4 \end{pmatrix}$$

Ainsi  $[X, Z] - Z$  s'écrit

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

et ne peut donc pas être égal à  $Y$ .

Supposons que  $Y$  soit de rang 3, alors  $Y$  est du type

$$Y_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ ou } Y_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Si  $Y$  est du type  $Y_1$ ; comme  $[Z, Y] = 0$ , on obtient

$$Z = \begin{pmatrix} \kappa & \beta & \gamma & * & * \\ 0 & \kappa & \beta & \gamma & 0 \\ 0 & 0 & \kappa & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 0 & * & * \end{pmatrix}$$

L'égalité  $[X, Y] = Y$  implique que  $X$  s'écrit

$$\begin{pmatrix} \kappa' & \beta' & \gamma' & * & * \\ 0 & \kappa' + 1 & \beta' & \gamma' & 0 \\ 0 & 0 & \kappa' + 2 & \beta' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \kappa' + 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & * & * \end{pmatrix}$$

Alors  $[X, Z] - Z$  est de la forme

$$\begin{pmatrix} -\kappa & 0 & \gamma & * & * \\ 0 & -\kappa & 0 & \gamma & 0 \\ 0 & 0 & -\kappa & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 0 & * & * \end{pmatrix}$$

donc différent de  $Y$ .

Si  $Y$  est du type  $Y_2$ , alors comme  $[Z, Y] = 0$  et  $Z$  est nilpotent, on obtient

$$Z = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \xi_0 & \beta & \xi_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \kappa & \xi_2 & 0 & \xi_3 \\ 0 & 0 & \kappa & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

L'égalité  $[X, Y] = Y$  implique que  $X$  s'écrit modulo  $R$

$$\begin{pmatrix} 0 & b & c & \delta & e \\ 0 & 1 & b & 0 & \delta \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & f & g & a & h \\ 0 & 0 & f & 0 & a+1 \end{pmatrix}$$

Alors  $[X, Z] - Z - Y$  s'écrit

$$\begin{pmatrix} 0 & \beta f - \kappa \delta - 1 & \xi_0 + \beta g + \xi_1 f - \delta \xi_2 - e \kappa & \beta(a-1) & \beta(h-b) + \xi_1 a - \delta \xi_3 \\ 0 & 0 & \beta f - \kappa \delta - 1 & 0 & \beta(a-1) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a \kappa & \kappa(b-h) + \xi_2(1-a) + \xi_3 f & 0 & \kappa \delta - \beta f - 1 \\ 0 & 0 & -a \kappa & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Cette matrice doit être identiquement nulle. En particulier on a

$$\beta f - \kappa \delta - 1 = \kappa \delta - \beta f - 1 = 0$$

ce qui est absurde.

Supposons maintenant que  $Y$  soit de rang 2 ; alors  $Y$  est du type  $Y_4$  ou :

$$Y_3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



Si  $Y$  est de la forme  $Y_3$ , alors l'égalité  $[Y, Z] = 0$  conduit à

$$Z = \begin{pmatrix} \kappa & \beta & * & * & * \\ 0 & \kappa & \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \kappa & 0 & 0 \\ 0 & 0 & * & * & * \\ 0 & 0 & * & * & * \end{pmatrix}$$

Ensuite l'égalité  $[X, Y] = Y$  implique que  $X$  est de la forme

$$\begin{pmatrix} \kappa' & \beta' & * & * & * \\ 0 & \kappa' + 1 & \beta' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \kappa' + 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & * & * & * \\ 0 & 0 & * & * & * \end{pmatrix}$$

En résulte que  $[X, Z] - Z$  s'écrit

$$\begin{pmatrix} -\kappa & 0 & * & * & * \\ 0 & -\kappa & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\kappa & 0 & 0 \\ 0 & 0 & * & * & * \\ 0 & 0 & * & * & * \end{pmatrix}$$

et ne peut donc être égal à  $Y$ .

Si  $X$  est de rang 1, alors le feuilletage associée à  $\mathcal{L}$  est en fait un pull-back.  $\square$

Reste donc à traiter le cas où  $Y = Y_4$ ; les matrices  $Y$  et  $Z$  commutent, d'où l'existence d'une base dans laquelle on peut jordaniser  $Y$  et  $Z$ . Par ailleurs la résolubilité de  $\mathcal{L}$  et l'égalité  $[X, Z] = Y + Z$  implique que  $Z$  est nilpotente; donc parmi les configurations du 4. il nous reste seulement la configuration

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } Z = \begin{pmatrix} 0 & \beta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

LEMME 6.11. *Cette configuration ne génère pas un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 3 sur  $\mathbf{CP}(4)$ .*

DÉMONSTRATION. L'égalité  $[X, Y] = Y$  implique que  $X$  s'écrit à combinaisons linéaires permises près

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & \zeta_1 & \zeta_2 & \zeta_3 \\ 0 & 1 & 0 & \zeta_4 & 0 \\ \zeta_5 & \zeta_6 & \zeta_7 & \zeta_8 & \zeta_9 \\ 0 & \zeta_{10} & 0 & \zeta_7 + 1 & 0 \\ 0 & \zeta_{11} & 0 & \zeta_{12} & \zeta_{13} \end{pmatrix}$$

Mais alors on a

$$[X, Z] - Y - Z = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & \beta\zeta_4 - \zeta_1\delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \delta\zeta_{10} - \zeta_5\beta & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

d'où  $-1 = 0$  ce qui est exclu. □

## CHAPITRE 7

### **$\mathcal{L}$ -feuilletages de degré 0 et de codimension quelconque sur $\mathbf{CP}(n)$ .**

Par définition, un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 0 et de codimension  $p$  sur  $\mathbf{CP}(n)$  est associé au champ de  $p$ -plans défini par une  $p$ -forme homogène  $\Omega$  de degré 1 sur  $\mathbf{C}^{n+1}$  annulant le champ radial  $R$ . Plus précisément une telle 1-forme s'écrit

$$\Omega = \sum_{I=(i_1, \dots, i_p)} L_I dz_{i_1} \wedge \dots \wedge dz_{i_p}$$

où  $L_I$  désigne une forme linéaire. On demande que  $i_R \Omega \neq 0$ . L'intégrabilité se traduit comme suit : en tout point  $m \in \mathbf{C}^{n+1}$  générique, i.e.  $\Omega(m) \neq 0$ , la 1-forme  $\Omega$  s'écrit localement

$$\Omega = \omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_p$$

où les  $\omega_i$  sont des 1-formes locales telles que le système de Pfaff engendré par les  $\omega_i$  soit intégrable :

$$\omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_p \wedge d\omega_i = 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, p\}$$

**THÉORÈME 7.1.** *Un feuilletage  $\mathcal{F}$  de codimension  $p$  et de degré 0 sur  $\mathbf{CP}(n)$  est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage.*

**DÉMONSTRATION.** Elle résulte de la description des formes  $\Omega$  qui suit.

Si  $p = n - 1$ , la condition  $i_R \Omega = 0$  implique l'existence d'un champ  $X_0$  tel que

$$\Omega = i_{X_0} i_R dz_0 \wedge \dots \wedge dz_n$$

Comme  $\deg \Omega = 1$ , on peut prendre pour  $X_0$  un champ constant, par exemple  $\frac{\partial}{\partial z_0}$ . Visiblement,  $\mathcal{F}$  est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage et l'algèbre  $\tilde{\mathcal{L}}$  est engendrée par les champs

$$z_j \frac{\partial}{\partial z_0}, \quad j = 0, \dots, n+1 \quad \text{et } R$$

Les  $\frac{z_i}{z_j}$ ,  $1 \leq i \leq j$ , sont des intégrales premières de  $\mathcal{F}$ . Dans la carte affine

$z_0 = 1$ , le feuilletage est associé au champ radial de  $\mathbf{C}^n$  :  $\sum_{i=1}^n z_i \frac{\partial}{\partial z_i}$ .

On suppose que  $p < n - 1$ . Soit  $m \in \mathbf{C}^{n+1}$  un point générique, la 1-forme  $\Omega$  s'écrit

$$\omega_0 \wedge \dots \wedge \omega_{p-1}$$

où  $\omega_i$  désigne une 1-forme locale en  $m$ . Le théorème de Frobenius classique assure l'existence de submersions  $f_1, \dots, f_p$  indépendantes telles que

$$\Omega \wedge df_i = 0$$

On peut supposer que  $f_i = z_i +$  termes de degré supérieur pour tout  $i = 0, \dots, p - 1$ . On a l'égalité  $d\Omega \wedge df_i = 0$  qui, comme la 1-forme  $d\Omega$  est à coefficients constants, conduit pour  $i = 0, \dots, p - 1$  à

$$d\Omega \wedge dz_i = 0$$

En résulte que

$$\Omega = dz_0 \wedge \dots \wedge dz_{p-1} \wedge \eta$$

où  $\eta$  est une 1-forme à coefficients constants : il existe une forme linéaire  $L$  telle que  $\eta = dL$ . L'identité d'Euler

$$L_R \Omega = i_R d\Omega = (p + 1)\Omega$$

assure que

$$dz_0 \wedge \dots \wedge dz_{p-1} \wedge dL \neq 0$$

On peut donc supposer que  $L = z_p$  ; on obtient alors

$$\begin{aligned} \Omega &= i_R(dz_0 \wedge \dots \wedge dz_p) \\ &= z_0 dz_1 \wedge \dots \wedge dz_p - z_1 dz_0 \wedge dz_2 \wedge \dots \wedge dz_p + \dots \end{aligned}$$

On remarque que les champs de vecteurs

$$z_j \frac{\partial}{\partial z_\ell}, \ell \geq p + 1 \text{ et } R_{ij} = z_i \frac{\partial}{\partial z_i} + z_j \frac{\partial}{\partial z_j}, i < j \leq p$$

annulent  $\Omega$ . Ceci démontre que  $\mathcal{F}$  est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage ; il possède comme intégrales premières

$$\frac{z_i}{z_j} \quad i < j \leq p$$

Les feuilles régulières sont d'adhérence des  $p$ -plans. □

Rappelons que lors de l'étude de l'exemple de Gordan-Noether nous avons rencontré des  $\mathcal{L}$ -feuilletages de codimensions différentes de 1 ; les feuilletages de degré 1 sur  $\mathbf{CP}(n)$  de codimension  $p$ , avec  $1 < p < n - 1$ , ne sont actuellement pas classifiés. Voici quelques exemples de feuilletages de codimension 2 obtenus par intersection de feuilletages de codimension 1 par exemple dans  $\mathbf{CP}(4)$ . On généralisera facilement.

Comme on l'a vu l'intersection de deux pinceaux d'hyperplans  $\frac{z_0}{z_1} = \text{cte}$  et  $\frac{z_0}{z_2} = \text{cte}$  définit un feuilletage de degré 0 sur  $\mathbf{CP}(4)$ . Ce feuilletage peut être vu comme dégénérescence de l'intersection de deux pinceaux d'hyperplans

génériques  $\frac{z_0}{z_1} = \text{cte}$  et  $\frac{z_2}{z_3} = \text{cte}$  qui lui aussi est un  $\mathcal{L}$ -feuilletage de degré 1 cette fois.

Considérons maintenant un feuilletage logarithmique  $\mathcal{F}_\omega$ , de degré 1, donné par

$$\omega_1 = z_0 z_1 z_2 \sum_{i=0}^2 \lambda_i \frac{dz_i}{z_i}$$

où  $\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 = 0$ . Nous allons l'intersecter avec un pinceau d'hyperplans ; le degré du feuilletage associé sera 1 ou 2 suivant que la position du pinceau d'hyperplans est générique ou non par rapport à  $\omega_1$ . Par exemple le feuilletage de codimension 2 obtenu par intersection de  $\mathcal{F}_{\omega_1}$  et de  $\frac{z_3}{z_4} = \text{cte}$  définit un feuilletage de degré 2 sur  $\mathbf{CP}(4)$ . Il possède les deux intégrales premières  $z_0^{\lambda_0} z_1^{\lambda_1} z_2^{\lambda_2}$  et  $\frac{z_2}{z_3}$ . On peut faire dégénérer ce pinceau sur le suivant  $\frac{z_0}{z_3} = \text{cte}$  et obtenir ainsi un feuilletage de degré 1. Ces deux feuilletages sont des  $\mathcal{L}$ -feuilletages. Si l'on considère un autre type de dégénérescence du pinceau, par exemple le pinceau  $\frac{z_0+z_1}{z_3} = \text{cte}$ , on obtient un feuilletage de degré 2 et de codimension 2 qui n'est pas un  $\mathcal{L}$ -feuilletage.



## Bibliographie

- [1] F. Cano. Reduction of the singularities of codimension one foliations in dimension three. *Ann. of Math.*, to appear.
- [2] F. Cano and D. Cerveau. Desingularization of nondicritical holomorphic foliations and existence of separatrices. *Acta Math.*, 169(1-2) :1–103, 1992.
- [3] D. Cerveau and A. Lins Neto. Irreducible components of the space of holomorphic foliations of degree two in  $\mathbb{CP}(n)$ ,  $n \geq 3$ . *Ann. of Math. (2)*, 143(3) :577–612, 1996.
- [4] D. Cerveau, A. Lins Neto, F. Loray, J.V. Pereira, and Touzet F. Algebraic reduction theorem for complex codimension one singular foliations. 2004.
- [5] D. Cerveau and J.-F. Mattei. *Formes intégrables holomorphes singulières*, volume 97 of *Astérisque*. Société Mathématique de France, Paris, 1982. With an English summary.
- [6] I. Dolgachev. *Lectures on invariant theory*, volume 296 of *London Mathematical Society Lecture Note Series*. Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
- [7] W. Fulton and J. Harris. *Representation theory*, volume 129 of *Graduate Texts in Mathematics*. Springer-Verlag, New York, 1991. A first course, Readings in Mathematics.
- [8] J. Harris. *Algebraic geometry*, volume 133 of *Graduate Texts in Mathematics*. Springer-Verlag, New York, 1992. A first course.
- [9] J. P. Jouanolou. *Équations de Pfaff algébriques*, volume 708 of *Lecture Notes in Mathematics*. Springer, Berlin, 1979.
- [10] B. Malgrange. Frobenius avec singularités. I. Codimension un. *Inst. Hautes Études Sci. Publ. Math.*, (46) :163–173, 1976.
- [11] J. V. Pereira. Communication personnelle.
- [12] J. V. Pereira and P. F. Sánchez. Transformation groups of holomorphic foliations. *Comm. Anal. Geom.*, 10(5) :1115–1123, 2002.
- [13] V. L. Popov and È. B. Vinberg. Invariant theory. In *Algebraic geometry, 4 (Russian)*, Itogi Nauki i Tekhniki, pages 137–314, 315. Akad. Nauk SSSR Vsesoyuz. Inst. Nauchn. i Tekhn. Inform., Moscow, 1989.
- [14] K. Saito. On a generalization of de-Rham lemma. *Ann. Inst. Fourier (Grenoble)*, 26(2) :vii, 165–170, 1976.
- [15] J.C. Tougeron. *Idéaux de fonctions différentiables*. Springer-Verlag, Berlin, 1972. *Ergebnisse der Mathematik und ihrer Grenzgebiete, Band 71*.